



TESIS TF 142310

PID AUTO TUNING MENGGUNAKAN PSO PADA SISTEM FOTOVOLTAIK PENJEJAK MATAHARI DUA-SUMBU

**ABDUL ADHIM
2413201004**

**DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**



THESIS TF 142310

AUTO TUNING OF PID CONTROLLER USING PSO FOR TWO-AXIS PHOTOVOLTAIC SOLAR TRACKING SYSTEM

**ABDUL ADHIM
2413201004**

**SUPERVISOR
Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.**

**MASTER PROGRAM
INDUSTRIAL INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016**

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)**

**di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

oleh :

**ABDUL ADHIM
NRP. 2413 201 004**

**Tanggal Ujian : 26 Januari 2016
Periode Wisuda : Maret 2016**

Disetujui oleh :

**1. Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.
NIP. 19600901 198701 1 001**


..... (Pembimbing)

**2. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.
NIP. 19620822 198803 1 001**


..... (Ketua Penguji)

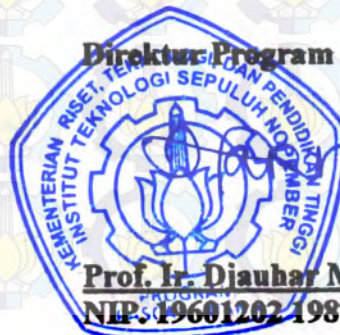
**3. Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002**

..... (Penguji)

**4. Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T. Ph.D.
NIP. 19710702 199802 1 001**


..... (Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,



**Prof. Ir. Djaubar Manfaat, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19601202 198701 1 001**

PID AUTO TUNING MENGGUNAKAN PSO PADA SISTEM FOTOVOLTAIK PENJEJAK MATAHARI DUA-SUMBU

Nama : Abdul Adhim
NRP : 2413 201 004
Pembimbing : Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.

ABSTRAK

Untuk meningkatkan efisiensi produksi listrik dari panel sel surya, salah satu cara yang bisa dilakukan adalah dengan menambahkan sistem penjejak matahari dua sumbu. Sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu diharapkan panel sel surya selalu menghadap matahari, sehingga energi listrik yang dihasilkan optimal. Salah satu teknik kontrol yang ditawarkan untuk mengatasi masalah ini, antara lain, kontrol PID konvensional.

Dalam penelitian ini algoritma PSO digunakan untuk mengoptimalkan kontroler PID yang ada atau PID auto-tuning berbasis algoritma *partikel swarm optimization*. Sehingga parameter PID dapat ditentukan dengan lebih tepat. Perancangan kontroler PSO-PID ini dilakukan dengan Komputer. Untuk sumbu putar horisontal diperoleh pada iterasi ke-tiga dengan fungsi fitness minimum akhir 1,33. Diperoleh nilai $K_p = 212,4$, $K_i = 27,1$, dan $K_d = 152$. Untuk sumbu putar vertikal parameter PID diperoleh pada iterasi ke-delapan dengan fungsi fitness minimum akhir 8,68 diperoleh $K_p = 487,2$, $K_i = 21,4$, dan $K_d = 732,02$.

Performansi sistem kontrol PSO-PID pada sumbu putar horisontal sistem stabil dengan nilai maksimum *overshoot* = 1,69%, dan *settling time* = 0,05 detik. Kinerja sistem kontrol PSO-PID untuk sumbu putar menghasilkan nilai maksimum *overshoot* = 1,83%, dan *settling time* = 0,104 detik. Sehingga sistem yang dirancang ini mampu mengikuti posisi matahari.

Kata kunci : *fotovoltaik, penjejak matahari, kontrol PID, PSO, PID auto tuning*

AUTO TUNING OF PID CONTROLLER USING PSO FOR TWO-AXIS PHOTOVOLTAIC SOLAR TRACKING SYSTEM

Student : Abdul Adhim
Student Identity Number : 2413 201 004
Supervisor : Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.

ABSTRACT

To improve the efficiency of electricity production of solar cell panels made by adding a solar tracking system. With a sun-tracking system sectional Photovoltaic (PV) is always facing the sun, so that the optimum electrical energy produced. There is a control technique is offered to solve this problem, among others, conventional PID control.

In this study built PSO-PID control system, to optimize existing PID control. Adding algorithms particle swarm optimization (PSO) as tuning PID. PID parameters can be selected so that more precise. Designed by PID control and PID-PSO for PC iteration .For horizontal axis of rotation with a minimum three-stage fitness function final 1.33. Values obtained $K_p = 212.4$, $K_i = 27.1$, and $K_d = 152$. In the design of control PV vertical axis of rotation at iteration to eight by the end of the minimum fitness function = 8.6801. values obtained $K_p = 487.2$, $K_i = 21.4$, and $K_d = 732.02$.

Performance PSO-PID control system of horizontal rotary axis stabilized system with maximum value overshoot = 1.69%, settling time = 0.05 sec. Performance PSO-PID control system for rotary axes generate maximum value overshoot = 1.83%, settling time = 0.104 seconds. So that the system is designed capable of tracking the position of the sun.

Keyword : *photovoltaic, solar tracking, PID control, PSO, auto tuning*

DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan	Satuan
b	konstanta viskositas gesek motor	N. m. s
C_1	Konstanta akselerasi kognitif	-
C_2	Konstanta akselerasi sosial	-
CL	<i>Close Loop</i>	-
d	Dimensi	-
DCM	Motor DC	-
EoT	<i>Equation of Time</i>	Menit
e	<i>error</i>	-
e	Emf balik	V
FT_{inc}	Fungsi transfer <i>solar tracker</i> sumbu horisontal	-
FT_{st}	Fungsi transfer <i>solar tracker</i> tanpa beban	-
FT_{vert}	Fungsi transfer <i>solar tracker</i> sumbu vertikal	-
Gbest	Posisi global terbaik	-
GMT	<i>Greenwich Meridian Time</i>	Jam
HRA	<i>Hour Angle</i>	$^{\circ}$ (derajat)
i	arus	Ampere
it	iterasi	-
ITAE	<i>Integral of Time weight Absolute Error</i>	-
J	Momen inersia	kg. m ²
J_1	Momen inersia PV sumbu putar horisontal	kg. m ²
J_2	Momen inersia PV sumbu putar vertikal	kg. m ²
J_{G1}, J_{G2}	Momen inersia gear 1 dan gear 2	kg. m ²
J_M	Momen inersia motor	kg. m ²
J_{st}	Momen inersia <i>solar tracker</i> tanpa beban	kg. m ²
J_{T1}	Momen inersia <i>solar tracker</i> sumbu horisontal	kg. m ²
J_{T2}	Momen inersia <i>solar tracker</i> sumbu vertikal	kg. m ²
K_b	konstanta gaya gerak listrik	V. sec. rad ⁻¹
Kcr	<i>Critical gain</i>	-

Kd	<i>Gain deivative</i>	-
Ki	<i>Gain integral</i>	-
Kp	<i>Gain proporsional</i>	-
K_t	konstanta torsi motor	N. m. Amp ⁻¹
L	Panjang PV	Meter
L	Induktansi	Henry
LST	<i>Local Solar Time</i>	Jam
LSTM	<i>Local Standard Time Meridian</i>	Jam
LT	<i>Local Time</i>	Jam
MIMO	<i>Multy Input Multy Output</i>	-
mo	<i>Maximum Overshoot</i>	%
m_{pv}	Massa PV	kg
N	Jumlah partikel dalam swarm	-
N_1, N_2	Jumlah gigi gear	-
$noon$	Waktu tengah hari	Jam
OL	<i>Open loop</i>	-
Pbest _i	Posisi terbaik suatu partikel	-
Pcr	<i>Critical period</i>	Detik
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>	-
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>	-
PV	<i>Photovoltaic</i>	-
R	Resistansi	Ω
$rand$	<i>random</i>	-
s	Notasi Laplace	-
STM	Panel sel surya jenis monokristalin	-
$sunrise$	Waktu matahari terbit	Jam
$sunset$	Waktu matahari terbenam	Jam
T	<i>Torsi</i>	N.m
TC	<i>Time Correction</i>	Menit
tp	<i>Peak time</i>	Detik
tr	<i>Rise time</i>	Detik
ts	<i>Settling time</i>	Detik

u	Nilai set point atau <i>input</i>	-
v_i	<i>Particecle velocity</i>	-
V	Tegangan motor DC	V
w	<i>Inertia weight</i>	-
W	Lebar PV	Meter
wR	Rasio kecepatan sudut putar	-
x_i	<i>Particle position</i>	-
y	Nilai <i>output</i>	-
ZN	<i>Ziegler Nichols</i>	-
α	Sudut elevasi atau <i>altitude</i> matahari	0 (derajat)
δ	Sudut deklinasi matahari	0 (derajat)
θ	Posisi sudut	0 (derajat) atau rad
θ_z or ζ	Sudut <i>zenith</i> matahari	0 (derajat)
γ	Sudut <i>azimuth</i> matahari	0 (derajat)
φ	Letak lintang suatu lokasi di bumi	0 (derajat)

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR



Segala puji bagi Allah Tuhan SWT, atas berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis masih diberi kesempatan untuk merasakan indahnya iman, islam, ikhsan dan semoga penulis selalu mendapatkan ridho-Nya. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kehadiran Nabi Muhammad SAW yang telah menunjukkan umatnya kejalan kebenaran di dunia sampai di akhirat. Penulis sangat bersyukur karena dapat menyelesaikan tesis yang berjudul:

“PID AUTO TUNING MENGGUNAKAN PSO PADA SISTEM FOTOVOLTAIK PENJEJAK MATAHARI DUA-SUMBU”

Pembuatan laporan tesis ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) di ITS Surabaya. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu untuk menyelesaikan tesis ini yaitu kepada:

1. Kedua orang tua yang selalu memberikan kasih sayang dan do'a sehingga tesis ini dapat selesai dengan baik.
2. Istri dan anakku tercinta yang selalu menghibur dan memberi semangat dikala suka maupun duka.
3. Bapak Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES. Ph.D selaku Rektor ITS. Bapak Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T. selaku Dekan FTI-ITS. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika dan dosen penguji. Ibu Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T., selaku Kaprodi Pascasarjana Teknik Fisika.
4. Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa' M.Sc., selaku dosen pembimbing yang selalu meluangkan waktu dan pikiran serta sabar dalam membimbing demi terselesaikannya tesis ini.
5. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. dan Bapak Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T. Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan yang membangun.

6. Bapak dan Ibu dosen jurusan Teknik Fisika yang telah mengajarkan kami ilmu yang bermanfaat dari semester awal sampai semester akhir.
7. Mbak Dieyah Martha selaku administrasi S2 Teknik Fisika yang sabar dan penuh tanggung jawab dalam melayani keperluan administrasi penulis.
8. Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi yang telah memberikan beasiswa BPP-DN kepada penulis dalam menempuh pendidikan magister di Teknik Fisika ITS
9. Teman-teman S2 Teknik Fisika angkatan 2013 Ryan, pak Alan, Atmoko, Giyanto Gareng, Hafidz, Hendra, Hendrik, Henry, Mades, Munadhif, Robert, Syamsiar, bu Anisa, Adisty, Dita, Fitri, Illa, Putri, dan Ulfa atas kerjasama dan kebersaannya selama ini. Kalian sungguh luar biasa.
10. Semua pihak yang telah membantu penulis hingga terselesaikannya tesis ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Semoga Allah SWT membalas dengan imbalan yang berlipat ganda atas amal perbuatan baik kita dan mengampuni semua dosa kita, Amiin Ya Robbal Aalamiin. Penulis telah berusaha secara maksimal dalam pembuatan laporan tesis ini. Namun, seperti kata pepatah *tiada gading yang tak retak*, penulis menyadari banyak kekurangan atas materi yang disajikan. Oleh karena itu, penulis memohon maaf atas kekurangan dalam pembuatan dan penyusunan. Penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi kesempurnaan laporan tesis ini. Besar harapan penulis agar laporan tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca khususnya bagi mahasiswa Teknik Fisika.

Surabaya, 9 Februari 2016

Abdul Adhim
(2413 201 004)

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR NOTASI	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan dan Manfaat	4
1.5 Sistematika Laporan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Klasifikasi Sistem Penjejak Matahari	5
2.2 Posisi Matahari	6
2.2.1 Waktu Matahari	7
2.2.2 Sudut Deklinasi	8
2.2.3 Sudut Elevasi, Sudut zenith dan Sudut Azimuth	9
2.3 Pengendali PID	11
2.4 Penalaan Parameter PID Menggunakan Aturan Ziegler Nichols	

Metode Kedua	12
2.5 Algoritma <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	13
2.6 Pengendali PSO-PID	15

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian	17
3.2 Studi Literatur dan Pengumpulan Data	19
3.3 Desain Sistem Kontrol PSO-PID pada Sistem Fotovoltaik Penjejak Matahari Dua Sumbu	20
3.4 Pemodelan Motor DC	20
3.5 Pemodelan Penjejak Matahari tanpa Beban	24
3.6 Pemodelan Sistem Fotovoltaik Penjejak Matahari dua Sumbu	25
3.6.1 Pemodelan Fotovoltaik Penjejak Matahari Sumbu Putar Horisontal	26
3.6.2 Pemodelan Fotovoltaik Penjejak Matahari Sumbu Putar vertikal	28
3.7 Perancangan Sistem kontrol PSO-PID	30
3.8 Proses Penalaan Kp, Ki, Kd dengan Algoritma PSO	31
3.9 Pemodelan Posisi Sudut Elevasi dan sudut <i>Azimuth</i> Matahari	37

BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Model Simulink Sistem	41
4.2 Model Simulink Uji Respon	42
4.3 Uji respon Motor DC	43
4.3.1 Respon <i>Open Loop</i> Motor DC	43
4.3.2 Respon <i>Close Loop</i> Motor DC	44
4.3.3 Respon Motor DC dengan Kontroler ZN-PID	44
4.3.4 Respon Motor DC dengan Kontroler PSO-PID	45
4.4 Uji Respon Penjejak Matahari tanpa Beban.....	47

4.5 Uji Respon Sistem Fotovoltaik Penjejak Matahari dua Sumbu dengan	
Beban Panel Sel Surya STM40-50	48
4.5.1 Uji Respon Sumbu Putar Horisontal	49
4.5.2 Uji Respon Sumbu Putar Vertikal.....	50
4.6 Hasil Uji Simulasi Sistem Kontrol PSO-PID Pada Sistem Fotovoltaik	
Penjejak Matahari dua Sumbu dg Beban Panel Sel Surya STM40-50	51
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN-LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Klasifikasi sistem penjejak matahari.....	5
Gambar 2.2 Penjejak matahari dua sumbu	6
Gambar 2.3 Waktu koreksi EoT dalam satu tahun	7
Gambar 2.4 Variasi musiman sudut deklinasi	9
Gambar 2.5 Sudut elevasi, sudut zenith dan sudut azimuth matahari	10
Gambar 2.6 Penentuan nilai <i>critical gain</i> Kcr dan <i>critical period</i> Pcr	13
Gambar 2.7 Diagram alir algoritma dasar PSO	14
Gambar 2.8 Struktur kontroler PSO-PID dengan indeks performansi ITAE.....	15
Gambar 2.9 Diagram alir PID auto tuning berbasis PSO	16
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	17
Gambar 3.2 Desain sistem kontrol pada sistem pv penjejak matahari dua sumbu	20
Gambar 3.3 Motor DC	21
Gambar 3.4 Ilustrasi penjejak matahari tanpa beban	24
Gambar 3.5 Ilustrasi penjejak matahari sumbu putar horisontal	26
Gambar 3.6 Ilustrasi penjejak matahari sumbu putar vertikal	28
Gambar 3.7 Struktur kontroler PSO-PID	30
Gambar 3.8 Inisialisasi swarm sebanyak 40 partikel	31
Gambar 3.9 Persebaran partikel swarm	32
Gambar 3.10 Posisi partikel swarm inisialisai dan posisi Gbest dalam 3D.....	32

Gambar 3.11 Persebaran partikel swarm dan posisi Gbest pada iterasi-1	33
Gambar 3.12 Posisi partikel swarm & pergerakan fungsi minimal pada iterasi-4	33
Gambar 3.13 Posisi partikel swarm dan Gbest 3D pada iterasi 5 dan 10	34
Gambar 3.14 Posisi partikel swarm dan Gbest dalam 3D pada iterasi-15	34
Gambar 3.15 Posisi partikel swarm dan Gbest dalam 3D pada iterasi-20	35
Gambar 3.16 Perubahan nilai Gbest sampai iterasi-20	35
Gambar 3.17 Perubahan nilai minimal fungsi tujuan sampai iterasi-20	35
Gambar 3.18 Posisi sudut elevasi matahari di kota Sidayu sepanjang siang	38
Gambar 3.19 Posisi sudut <i>azimuth</i> matahari di kota Sidayu sepanjang siang	38
Gambar 4.1. Model simulink motor DC	41
Gambar 4.2 model simulink uji respon sistem loop terbuka	42
Gambar 4.3 Model simulink uji respon sistem loop tertutup	42
Gambar 4.4 Model simulink uji respon sistem dengan sistem kontrol	42
Gambar 4.5 Respon <i>open loop</i> motor DC dengan <i>input step</i>	43
Gambar 4.6 Respon pengujian sistem tertutup dengan <i>input step</i>	44
Gambar 4.7 Respon pengujian sistem menggunakan kontroler ZN-PID	45
Gambar 4.8 Respon pengujian sistem menggunakan kontroler PSO-PID	45
Gambar 4.9 Perbandingan Respon sistem antara ZN-PID dan PSO-PID	46
Gambar 4.10 Respon sistem kontroler PSO-PID input step dengan gangguan...	47
Gambar 4.11 Respon pengujian <i>open loop</i> dan <i>close loop</i> penjejak matahari tanpa beban	48

Gambar 4.12 Respon pengujian dengan kontroler ZN-PID dan PSO-PID	
penjejak matahari tanpa beban	48
Gambar 4.13 Respon pengujian <i>open loop</i> dan <i>close loop</i> Sistem penjejak	
matahari sumbu putar horisontal dengan beban STM40-50	49
Gambar 4.14 Respon pengujian dengan kontroler ZN-PID dan PSO-PID sistem	
penjejak matahari sumbu putar horisontal dg beban STM40-50 ...	50
Gambar 4.15 Respon pengujian <i>open loop</i> dan <i>close loop</i> sistem penjejak	
matahari sumbu putar vertikal dengan beban STM40-50	51
Gambar 4.16 Respon pengujian dengan kontroler ZN-PID dan PSO-PID sistem	
penjejak matahari sumbu putar vertikal dengan beban STM40-50	51
Gambar 4.17 Hasil simulasi sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik	
penjejak matahari dua sumbu saat matahari terlihat	52
Gambar 4.19 Hasil simulasi sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik	
penjejak matahari dua sumbu selama dua hari	52

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Karakteristik penguatan pengendali PID	12
Tabel 2.2 Metode kedua aturan penalaan Ziegler Nichols	13
Tabel 3.1 Hasil perhitungan momen inersia total sumbu putar horisontal	27
Tabel 3.2 Fungsi transfer <i>solar tracker</i> sumbu putar horisontal tiap model PV	27
Tabel 3.3 Hasil perhitungan momen inersia total sumbu putar vertikal	29
Tabel 3.4 Fungsi transfer <i>solar tracker</i> sumbu putar vertikal tiap model PV	29
Tabel 3.5 Nilai Gbest (K_p , T_i , T_d) dan fungsi minimal tiap iterasi	36
Tabel 4.1 Perbandingan performansi Motor DC	46
Tabel 4.2 Perbandingan performansi Solar Tracker tanpa beban PV	47
Tabel 4.3 Perbandingan performansi sumbu putar horisontal PV=STM40-50...	49
Tabel 4.4 Perbandingan performansi sumbu putar vertikal PV=STM40-50	50

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagai negara tropis, potensi tenaga surya di Indonesia cukup tinggi dengan intensitas sebesar $4,8 \text{ kWh/m}^2$ per hari dengan pemanfaatan baru sebesar 42,78 MW (Indonesia Energi Outlook 2013). Dengan berlimpahnya sumber energi surya yang belum dimanfaatkan secara optimal, sedangkan di sisi lain ada sebagian wilayah Indonesia yang belum terlistriki karena tidak terjangkau oleh jaringan listrik PLN, sehingga Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan sistemnya yang modular dan mudah dipindahkan merupakan salah satu solusi yang dapat dipertimbangkan sebagai salah satu pembangkit listrik alternatif. Sayangnya biaya pembangkitan PLTS masih lebih mahal apabila dibandingkan dengan biaya pembangkitan pembangkit listrik tenaga konvensional, karena sampai saat ini piranti utama untuk mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik (modul fotovoltaik) masih merupakan piranti yang didatangkan dari luar negeri serta efisiensi dari modul fotovoltaik sangat rendah yaitu sebesar 16% yang menyebabkan harga PLTS per kW masih sangat tinggi (Rahardjo dkk, 2005).

Salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi panel sel surya yaitu dengan menambahkan sistem kendali penjejak matahari. Sistem kendali penjejak matahari adalah sistem kendali yang selalu mengikuti posisi matahari. Tujuan dari sistem penjejak matahari ini adalah untuk menempatkan penampang agar selalu dalam posisi menghadap ke arah sinar matahari, sehingga jika ditempatkan panel sel surya di atasnya, energi listrik yang dihasilkan oleh panel sel surya menjadi maksimal.

Sistem penjejak matahari diklasifikasikan menjadi, yaitu penjejak matahari satu sumbu dan penjejak matahari dua sumbu. Pada pada sistem penjejak matahari satu sumbu dibedakan menjadi dua, yaitu sistem penjejak sudut elevasi matahari dan sistem penjejak sudut *azimuth* matahari. Sedangkan pada sistem penjejak matahari dua sumbu, sudut yang dikendalikan adalah sudut elevasi

matahari dan sudut azimuth matahari sekaligus. Sudut elevasi adalah sudut ketinggian matahari diukur dari arah horizontal. Pada saat matahari terbit atau matahari terbenam nilai sudut elevasi adalah nol derajat. Nilai maksimal sudut elevasi adalah 90^0 pada saat posisi matahari tepat diatas kepala. Sudut *azimuth* matahari adalah posisi sudut matahari diukur dari arah utara bumi. Nilai sudut *azimuth* matahari 0^0 di arah utara, 90^0 di arah timur, 180^0 di arah selatan, dan 270^0 di arah barat.

Perbandingan secara kualitatif dan kuantitatif performansi sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu dalam hal radiasi dan hasil energi lebih baik dari sistem fotovoltaik posisi tetap berdasarkan lingkungan iklim Malaysia (Lee dkk,2013). Penelitian (Catarius dkk, 2010) menghitung peningkatan efisiensi dalam satu tahun pada *Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracker* dibanding tanpa sistem penjejak matahari adalah sebesar 48,98%, dan efisiensi meningkat 36,504% dalam satu tahun bila dibandingkan dengan *single-axis solar tracker*.

Untuk mengembangkan sistem fotovoltaik penjejak matahari, beberapa penelitian telah dilakukan diantaranya Hossein Mousazadeh. yang menganalisa sistem *solar tracker* untuk memaksimalkan daya keluarannya. Sistem kendali yang digunakan berkembang baik konvensional maupun sistem kendali cerdas, bahkan dikombinasikan dengan algoritma optimasi seperti PSO. Fathoni dan Imam Abadi telah mengembangkan PSO untuk menentukan fungsi keanggotaan *fuzzy* dan dinamakan kontrol PSF (*particle Swarm Fuzzy*).

Dalam penelitian ini mencoba merancang sistem penjejak matahari dua sumbu atau penjejak matahari sudut elevasi dan sudut *azimuth* dikendalikan oleh PID dimana parameter PID diperoleh dengan menggunakan algoritma PSO (PID auto tuning menggunakan PSO). Dengan PID auto tuning penjejak matahari dua sumbu ini diharapkan pada setiap saat permukaan panel surya selalu dalam posisi tegak lurus terhadap posisi matahari.

Pengendali PID (*Proportional Integral Derivative*) telah banyak digunakan untuk mengontrol berbagai aplikasi kecepatan dan posisi. Di antara metode penalaan PID konvensional dan terkenal adalah metode Ziegler-Nichols. Untuk berbagai proses praktis, pendekatan ini bekerja cukup baik.

Namun, kadang-kadang tidak memberikan penalaan yang baik dan cenderung menghasilkan overshoot besar. Oleh karena itu, metode ini biasanya membutuhkan penalaan ulang sebelum diterapkan untuk mengontrol proses industri. Untuk meningkatkan kemampuan teknik penalaan parameter PID, salah satunya adalah dengan menggunakan optimasi PSO. PSO adalah algoritma heuristic modern berbasis populasi yang terinspirasi dari perilaku gerakan kawanan hewan seperti lebah. Dalam penelitian ini PSO digunakan untuk menala parameter PID controller.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada perancangan sistem kontrol PSO-PID pada fotovoltaiik penjejak matahari dua sumbu ini adalah

1. Bagaimana memodelkan sistem fotovoltaiik penjejak matahari dua sumbu untuk berbagai model panel sel surya yang digunakan.
2. Bagaimana memodelkan posisi sudut elevasi dan sudut *azimuth* matahari setiap saat pada suatu lokasi dipermukaan bumi.
3. Bagaimana menentukan parameter PID (K_p , K_i , K_d) menggunakan algoritma PSO agar mampu menghasilkan sistem kendali yang stabil pada sistem fotovoltaiik penjejak matahari dua sumbu.
4. Bagaimana merancang sistem kontrol PSO-PID pada fotovoltaiik penjejak matahari dua sumbu tanpa sensor yang aman dan bekerja sepanjang waktu.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada dalam penelitian ini adalah:

1. Metode kendali yang digunakan adalah PSO-PID.
2. Sistem fotovoltaiik penjejak matahari dua sumbu yang dimodelkan menggunakan gear transmisi model *spur gears*.
3. Lima panel *photovoltaic* sebagai uji beban yang digunakan,
 - ✓ STM5 : dimensi 304x218x30 mm, dengan massa 1,2 kg
 - ✓ STM10 : dimensi 290x290x17 mm, dengan massa 1,4 kg
 - ✓ STM20 : dimensi 545x361x30 mm, dengan massa 3 kg
 - ✓ STM30 : dimensi 450x545x30 mm, dengan massa 3,5 kg
 - ✓ STM40-50 : dimensi 637x545x35 mm, dengan massa 4,5 kg

4. Posisi matahari setiap saat yang dimodelkan adalah sudut elevasi dan sudut *azimuth* matahari
5. Penelitian ini dilakukan secara simulasi menggunakan software MATLAB/Simulink.

1.4 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dan manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Mampu memodelkan sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu untuk berbagai model panel sel surya yang digunakan.
2. Mampu memodelkan posisi sudut elevasi dan sudut *azimuth* matahari setiap saat pada suatu lokasi dipermukaan bumi.
3. Mampu menggunakan algoritma PSO untuk mengoptimasi parameter PID (K_p , K_i , K_d) sehingga menghasilkan sistem kendali yang stabil pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu.
4. Bagaimana merancang sistem kontrol PSO-PID pada fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu tanpa sensor yang aman dan bekerja sepanjang waktu.

1.5 Sistematika Laporan

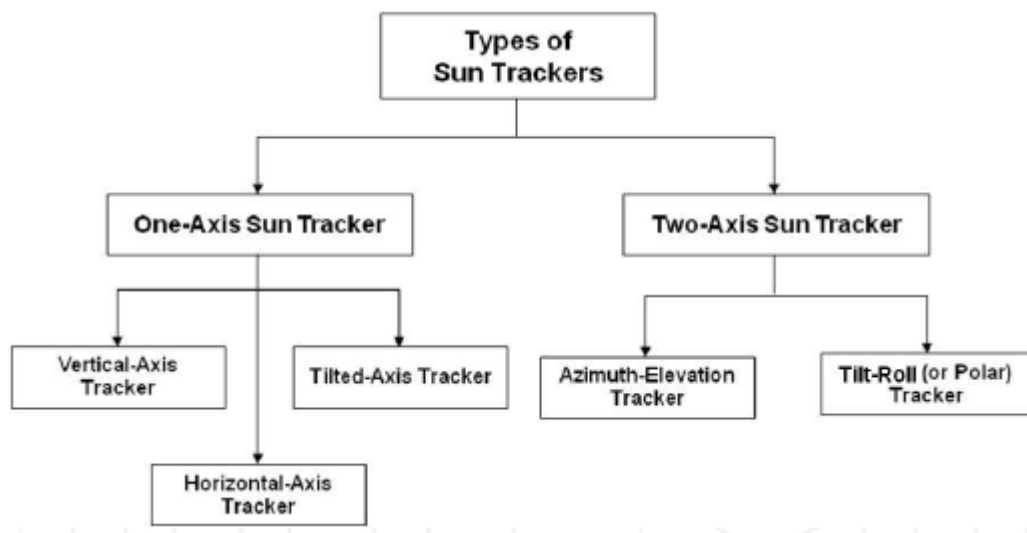
Sistematika laporan tesis ini terdiri dari 5 bab. Bab 1 membahas pendahuluan yaitu latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika laporan. Bab 2 membahas teori penunjang yaitu klasifikasi penjejak matahari, posisi matahari, pengendali PID, pengendali ZN-PID, Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO), dan pengendali PSO-PID. Bab 3 membahas metodologi penelitian yaitu alur penelitian, studi literatur dan pencarian data, pemodelan sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu, perancangan sistem kontrol PSO-PID, proses penalaan parameter PID dengan algoritma PSO, dan pemodelan posisi sudut elevasi dan sudut *azimuth* matahari. Bab 4 berisi analisis dan pembahasan. Bab 5 membahas kesimpulan hasil penelitian dan saran sebagai penunjang untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Klasifikasi Sistem Penjejak Matahari

Gerak rotasi Bumi terhadap matahari mempengaruhi intensitas radiasi matahari di Bumi. Sistem penjejak matahari bertujuan untuk mengendalikan orientasi bidang terhadap intensitas matahari maksimum. Secara garis besar sistem penjejak matahari dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu satu-sumbu dan dua-sumbu. Gambar 2.1 berikut adalah klasifikasi sistem penjejak matahari (Chong & Wong, 2010)

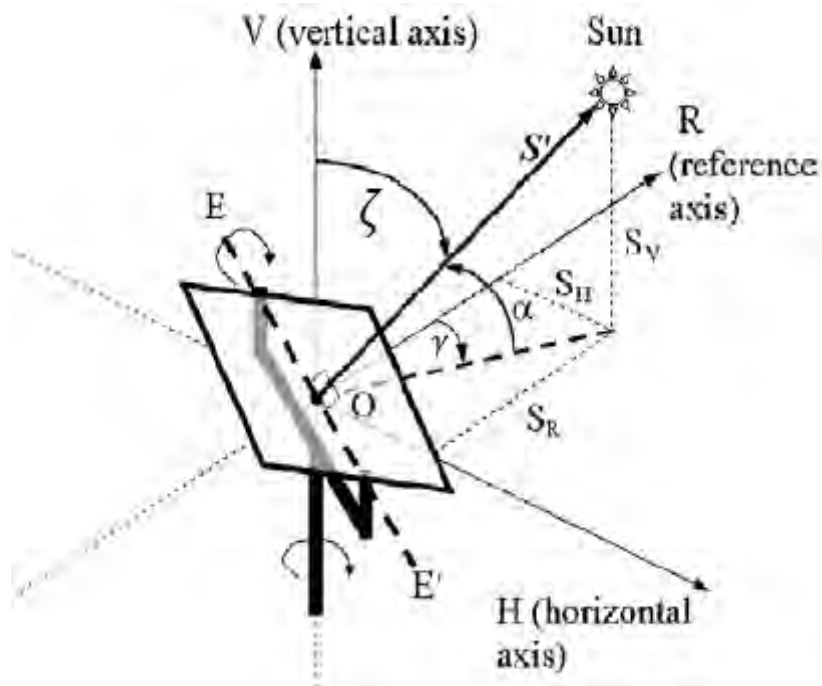


Gambar 2.1 Klasifikasi sistem penjejak matahari (Chong & Wong, 2010)

Secara umum sistem penjejak matahari diklasifikasikan menjadi dua, yaitu penjejak matahari satu sumbu dan penjejak matahari dua sumbu. Penjejak matahari satu sumbu dibedakan jadi tiga, yaitu penjejak matahari sumbu horizontal, penjejak matahari sumbu vertikal, dan *tilted-axis tracker*. Sedangkan Penjejak matahari dua sumbu dibedakan menjadi dua, yaitu *azimuth-elevation tracker* dan *tilt-roll (or polar) tracker*.

Penjejak matahari jenis *azimuth-elevation* terdiri dari dari sumbu putar horizontal dan sumbu putar vertikal. Sumbu putar horizontal pada penjejak matahari

dimaksudkan untuk mengikuti ketinggian matahari atau sudut elevasi atau *altitude* (α) matahari. Sumbu putar vertikal pada penjejak matahari dimaksudkan untuk mengikuti sudut azimuth (γ) matahari. Penjejak matahari dua sumbu ditunjukkan dalam Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Penjejak matahari dua sumbu (Chong-Wong 2010)

Berdasarkan Gambar 2.2 diatas, sumbu referensi penjejak matahari R adalah arah utara (0^0). Posisi matahari dapat direpresentasikan dalam dua sudut yaitu sudut elevasi (α) dan sudut azimuth (γ).

2.2 Posisi Matahari

Posisi matahari ditentukan berdasarkan sudut elevasi (α) dan sudut azimuth (γ) . Kedua posisi sudut tersebut berubah setiap waktu sepanjang tahun. Untuk mengetahui posisi matahari secara garis besar diperlukan dua parameter, yaitu lokasi tempat mengukur dan waktu pengukuran. Parameter yang terkait lokasi adalah bujur dan lintang. Parameter yang terkait waktu adalah jam dan tanggal. Disuatu lokasi di permukaan bumi pada jam dan tanggal yang sama, matahari berada pada posisi yang sama untuk tahun yang berbeda.

2.2.1 Waktu Matahari

Untuk menentukan posisi matahari (sudut elevasi dan sudut azimuth) sepanjang waktu, diperlukan pengetahuan terkait waktu matahari. Berikut adalah beberapa istilah dan perhitungan terkait waktu matahari. (<http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-time>).

➤ Waktu lokal LT (*Local Time*)

Waktu lokal atau waktu setempat suatu lokasi di permukaan bumi akibat penyesuaian zona waktu suatu wilayah.

➤ Waktu standar bujur setempat LSTM (*Local Standard Time Meridian*)

Waktu standar bujur setempat adalah waktu suatu lokasi berdasarkan posisi bujur terhadap standar waktu Greenwich (GMT).

$$LSTM = 15^0 \cdot (LT - GMT) \quad (2.1)$$

➤ Persamaan waktu EoT (*equation of time*)

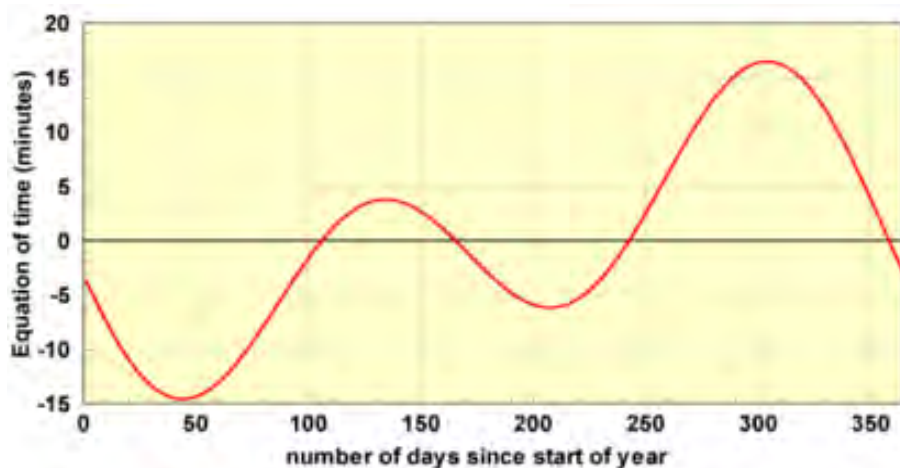
Persamaan waktu (menit) adalah persamaan empiris yang mengoreksi eksentrisitas orbit bumi dan kemiringan sumbu bumi.

$$EoT = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (2.2)$$

Dimana

$$B = \frac{360}{365} (d - 81) \quad [^0] \quad (2.3)$$

d adalah jumlah hari yang dihitung dari awal tahun. Waktu koreksi EoT dalam satu tahun ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Waktu koreksi EoT dalam satu tahun

(<http://www.pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/Properties-of-Sunlight/Images/EOFTIME.gif>)

Dari Gambar 2.3 dapat diketahui bahwa nilai EoT berubah setiap hari. Nilai EoT terendah terjadi pada hari ke-44 (tanggal 13 Februari) dan nilai EoT tertinggi pada hari ke-303 dan hari ke-304 (tanggal 30 dan 31 Oktober).

(<http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/sun-position-calculator#>)

➤ Koreksi waktu TC (*Time Correction*)

Koreksi waktu TC (menit) dihitung berdasarkan variasi waktu LSTM dalam zona waktu tertentu karena variasi bujur dalam zona waktu dan EoT.

$$TC = 4(Longitude - LSTM) + EoT \quad (2.4)$$

Factor 4 berasal dari kenyataan bahwa bumi berotasi 1° tiap 4 menit.

➤ Waktu matahari lokal LST (*Local Solar Time*)

LST didefinisikan sebagai waktu ketika matahari di posisi tertinggi di langit.

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad (2.5)$$

➤ Sudut jam HRA (*Hour Angle*)

HRA mengubah waktu matahari lokal (LST) ke dalam jumlah derajat dimana matahari bergerak melintasi langit. Menurut definisi, HRA adalah 0° pada siang hari. Karena Bumi berputar 15° per jam, setiap jam dari siang hari, gerakan sudut matahari di langit sebesar 15° . Di pagi hari sudut jam negatif, sore sudut jam positif.

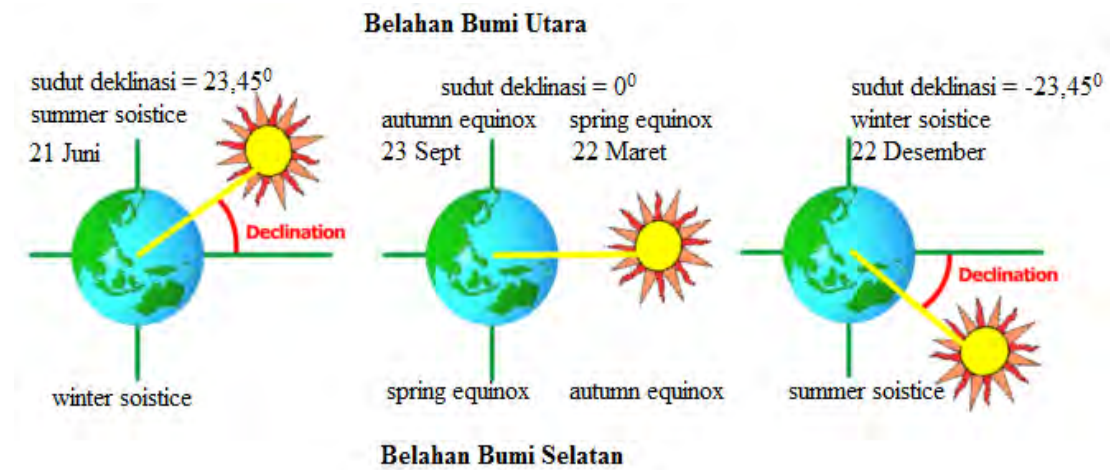
$$HRA = 15^\circ(LST - 12) \quad (2.6)$$

2.2.2 Sudut Deklinasi

Sudut deklinasi δ terjadi karena kemiringan sumbu rotasi bumi dalam mengelilingi matahari. Jika bumi tidak miring terhadap sumbu rotasi, deklinasi selalu akan menjadi 0° . Kemiringan maksimal bumi terhadap sumbu rotasi $23,45^\circ$ dan sudut deklinasi bervariasi plus minus dari nilai tersebut. Pada musim semi dan gugur (22 maret dan 23 september) sudut deklinasi sama dengan 0° .

Deklinasi matahari adalah sudut antara khatulistiwa dan garis yang ditarik dari pusat Bumi ke pusat matahari. Deklinasi matahari mengakibatkan empat musim di daerah subtropis baik belahan bumi utara maupun belahan bumi selatan. Variasi

musiman sudut deklinasi matahari dan perubahan musim ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Variasi musiman sudut deklinasi

(http://www.pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/Properties-of-Sunlight/Images/sun_declination_angle.png)

Sudut deklinasi dapat dihitung dengan persamaan

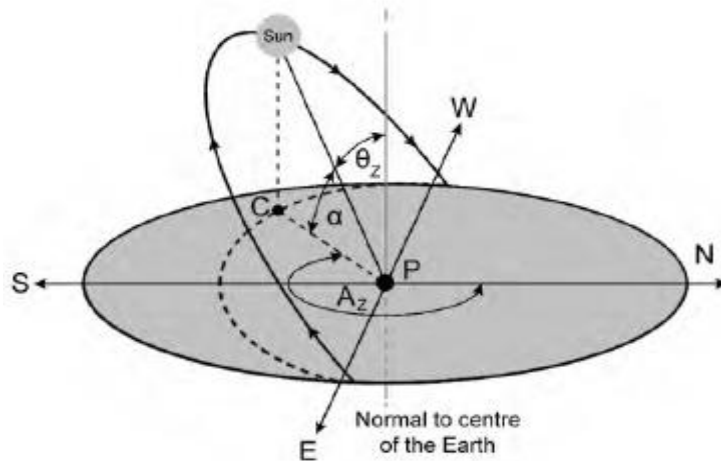
$$\delta = 23,45^{\circ} \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(d - 81)\right) \quad (2.7)$$

Deklinasi adalah nol pada *ekuinoxs* (Maret 22 dan 22 September), positif selama musim panas di belahan bumi utara dan negatif selama musim dingin di belahan bumi utara. Deklinasi mencapai maksimal $23,45^{\circ}$ pada 22 Juni (titik balik matahari musim panas di belahan bumi utara) dan minimal $-23,45^{\circ}$ pada 22 Desember (musim dingin solstice di belahan bumi utara).

2.2.3 Sudut Elevasi , Sudut Zenith dan Sudut Azimuth

Rotasi dan revolusi bumi terhadap matahari mengakibatkan posisi matahari berubah setiap waktu. Rotasi bumi menyebabkan matahari terbit dari timur dan terbenam di barat setiap hari. Revolusi bumi terhadap matahari menyebabkan posisi matahari tidak tepat di garis katulistiwa, selalu berubah dari utara katulistiwa ke selatan katulistiwa dan sebaliknya sepanjang tahun. Pergerakan matahari dari timur ke barat mengakibatkan sudut elevasi matahari selalu berubah, demikian juga perubahan posisi matahari di sekitar garis katulistiwa menyebabkan perubahan sudut

azimuth matahari selalu berubah. Penggambaran posisi matahari dari suatu lokasi di bumi ditunjukkan dalam Gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.5 Sudut elevasi, sudut zenith dan sudut azimuth matahari
(Prinsloo G. & Dobson R., 2014)

Berikut adalah penjelasan tentang sudut elevasi, sudut zenith dan sudut azimuth matahari.

➤ Sudut elevasi

Sudut elevasi (sudut ketinggian) adalah ketinggian sudut matahari di langit diukur dari horizontal. Saat matahari terbit sudut elevasi adalah 0° dan 90° ketika matahari tepat di atas kepala (yang terjadi misalnya di ekuator pada musim semi dan gugur *ekuinoks*).

Sudut elevasi bervariasi sepanjang hari. Hal ini juga tergantung pada garis lintang dari lokasi tertentu dan hari dalam setahun. Ketinggian α dapat ditemukan dengan menggunakan rumus

$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \sin \varphi - \cos \delta \cos \varphi \cos(HRA)) \quad (2.8)$$

δ adalah sudut deklinasi, yang tergantung pada hari dalam setahun. φ adalah lokasi lintang di bumi. HRA adalah sudut jam.

➤ Sudut zenith

Sudut zenith (ζ) adalah sudut ketinggian matahari diukur dari arah vertikal. Sudut zenith mirip dengan sudut elevasi tetapi berbeda pada acuan pengukurannya.

Sudut elevasi diukur dari arah horisotal, sudut zenith diukur dari arah vertical. Hubungan sudut zenith dan sudut elevasi dirumuskan,

$$\zeta = 90^0 - \alpha \quad (2.9)$$

➤ Waktu matahari terbit, waktu tengah hari, dan waktu matahari terbenam

Waktu matahari terbit (*sunrise*) dan terbenam (*sunset*) setiap hari dalam satu tahun tidak sama. Waktu terbit dan terbenam matahari terjadi pada saat sudut elevasi 0^0 atau sudut zenith 90^0 . *Sunrise* dan *sunset* dipengaruhi letak lintang, sudut deklinasi, sudut elevasi dan koreksi waktu (TC).

$$sunrise = 12 - \frac{1}{15^0} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) - \frac{TC}{60} \quad (2.10)$$

$$sunset = 12 + \frac{1}{15^0} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) - \frac{TC}{60} \quad (2.11)$$

$$noon = \frac{(sunrise - sunset)}{2} \quad (2.12)$$

➤ Sudut Azimuth

Sudut azimuth adalah arah kompas sinar matahari yang diukur dari arah utara (0^0) berputar searah jarum jam. Sudut azimuth bervariasi sepanjang hari seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.

Pada ekuinoks, matahari terbit tepat dari arah timur dan terbenam tepat di barat terlepas dari letak lintang, sehingga membuat azimuth sudut 90° saat matahari terbit dan 270° saat matahari terbenam. Secara umum, sudut azimuth berubah sepanjang waktu dan berulang setiap tahun.

Posisi sudut azimuth matahari sepanjang hari tergantung sudut deklinasi (δ), letak lintang (φ), sudut elevasi (α) dan sudut jam (HRA).

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos (HRA)}{\cos \alpha} \right) \quad (2.13)$$

2.3 Pengendali PID

Pengendali PID menggunakan teknik umpan balik, dengan masukan pengendali adalah *error* (kesalahan). *Error* atau kesalahan adalah selisih dari *set point* (nilai keluaran yang diinginkan / referensi) dengan nilai keluaran sebenarnya yang terukur.

$$e(t) = u(t) - y(t) \quad (2.14)$$

Dimana $e(t)$ = *error* (kesalahan), $u(t)$ = nilai *set point*, dan $y(t)$ = nilai keluaran.

Keluaran dari pengendali PID adalah jumlahan dari tiga bagian, yaitu $u_p(t)$ yang proporsional dengan kesalahan (*error*), $u_i(t)$ yang proporsional dengan integral waktu kesalahan, dan $u_d(t)$ yang proporsional dengan turunan kesalahan.

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \quad (2.15)$$

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} = K_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.16)$$

Karakteristik pengendali PID ditunjukkan oleh Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Karakteristik penguatan pengendali PID

Penguatan	<i>Rise time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling time</i>	<i>Steady state error</i>
K_p	Mengurangi	Menambah	Perubahan kecil	Mengurangi
K_i	Mengurangi	Menambah	Menambah	Menghilangkan
K_d	Perubahan kecil	Mengurangi	Mengurangi	Perubahan kecil

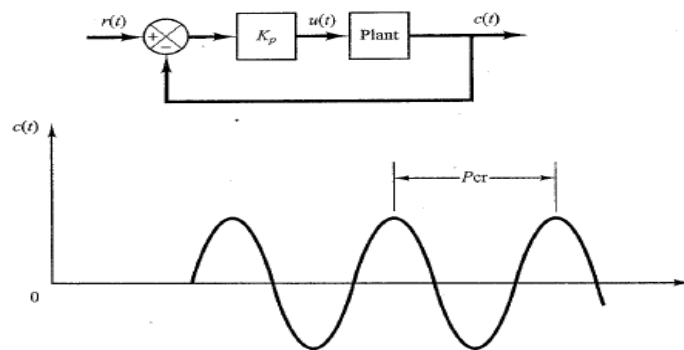
Hubungan-hubungan tersebut tidak terlalu tepat, sehingga ketika salah satu konstanta pengendali diubah, maka sistem mungkin tidak akan bereaksi seperti yang diinginkan. Tabel 2.1 di atas digunakan sebagai acuan dalam merancang pengendali PID.

2.4 Penalaan Parameter PID Menggunakan Aturan Ziegler Nichols Metode Kedua

Metode kedua aturan penalaan Ziegler Nichols nilai parameter PID (K_p , T_i , dan T_d) berbasis nilai *critical gain* (K_{cr}) dan *critical period* (P_{cr}).

Dalam metode kedua, plant dikendalikan secara proporsional dengan gain K_p . Nilai gain terus ditambah dari 0 sampai nilai kritis K_{cr} di mana ditunjukkan dengan output pertama yang berosilasi secara berkelanjutan (Jika output tidak menghasilkan osilasi berkelanjutan, maka metode ini tidak berlaku). Sementara nilai

critical period P_{cr} diperoleh dari periode osilasi. Proses penentuan nilai K_{cr} dan P_{cr} ditunjukkan pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Penentuan nilai *critical gain* K_{cr} dan *critical period* P_{cr} .
(Ogata K., 2002)

Aturan penalaan parameter PID metode kedua Ziegler Nichols terlihat dalam tabel 2.2 berikut.

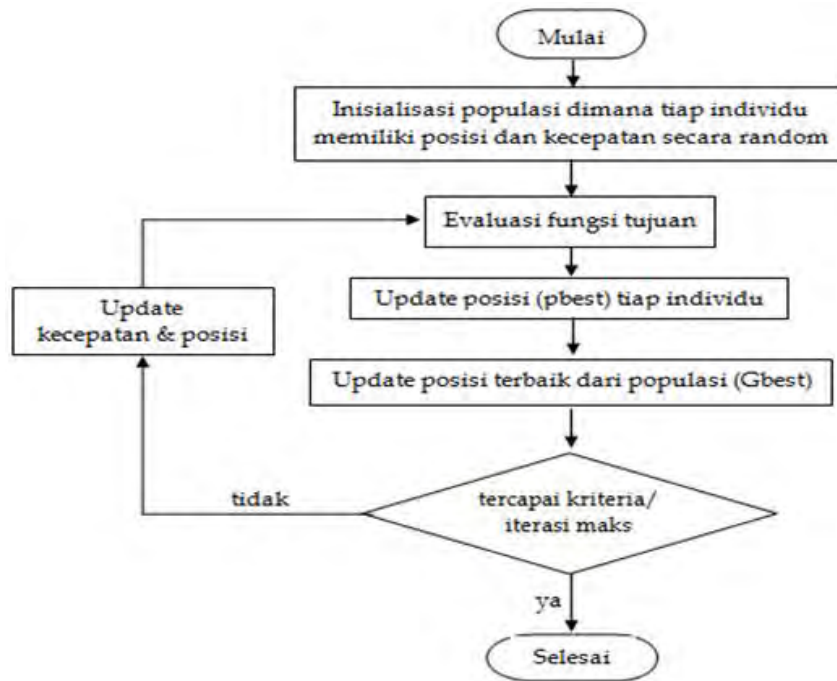
Tabel 2.2 Metode kedua aturan penalaan Ziegler Nichols

Type kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} P_{cr}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 P_{cr}$	$0,25 P_{cr}$

2.5 Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Menurut James Kennedy dan Russel Eberhart (1995), Particle swarm optimization (PSO) adalah salah satu algoritma heuristic modern berbasis populasi yang terinspirasi dari perilaku gerakan kawanan hewan seperti ikan (school of fish), hewan herbivor (herd), dan burung (flock) dalam mencari makanan. Mereka bergerak secara bersamaan dalam suatu kelompok dan bukan tiap individu. selanjutnya tiap objek hewan disederhanakan menjadi sebuah partikel. Suatu partikel dalam ruang memiliki posisi yang dikodekan sebagai vektor koordinat. Vektor posisi ini dianggap sebagai keadaan yang sedang ditempati oleh suatu partikel di ruang pencarian. Setiap posisi dalam ruang pencarian merupakan alternatif solusi yang dapat dievaluasi menggunakan fungsi objektif yangmana setiap partikel bergerak dengan kecepatan v .

Menurut Alrijadjis (2010), PSO sendiri merupakan salah satu teknik optimasi dan termasuk jenis teknik komputasi evolusi. Metode ini memiliki robust yang bagus untuk memecahkan persoalan yang mempunyai karakteristik nonlinier dan nondifferentiability, multiple optima, dimensi besar melalui adaptasi yang diturunkan dari teori psikologi-sosial.



Gambar 2.7 Diagram alir algoritma dasar PSO

Persamaan PSO dinyatakan dalam

- Update kecepatan

$$v_{i,m}^{(t+1)} = w \cdot v_{i,m}^{(t)} + c_1 * Rand * (pbest_{i,m} - x_{i,m}^{(t)}) + c_2 * Rand * (gbest_m - x_{i,m}^{(t)}) \quad (2.17)$$

Inertia weight (w) dapat dibuat konsta dengan harga antara 0.2 – 0.9.

- Update posisi $x_{i,m}^{(t+1)} = x_{i,m}^{(t)} + v_{i,m}^{(t+1)}$ (2.18)

Dari persamaan PSO, terbagi dalam tiga bagian utama:

- *Momentum Part* : $w \cdot v_{i,m}^{(t)}$

Kecepatan partikel tidak dapat berubah secara bebas, melainkan mengalami perubahan melalui kecepatan sekarang

➤ *Cognitive part* : $c_1 * Rand * (pbest_{i,m} - x_{i,m}^{(t)})$ (2.19)

Merupakan bagian pengalaman partikel, belajar dari pengalaman partikel itu sendiri.

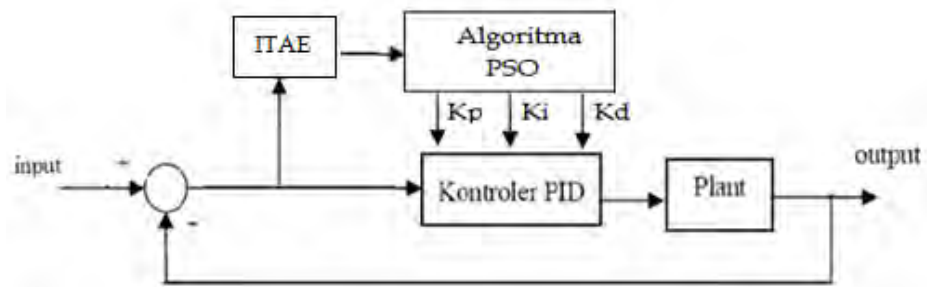
➤ *Social part* : $c_2 * Rand * (gbest_m - x_{i,m}^{(t)})$ (2.20)

Merupakan kerja sama antar partikel, belajar dari pengalaman partikel-partikel lain.

Menurut Rochmatulah (2009), fungsi *fitness* ($f(x)$) digunakan untuk mengetahui seberapa baik posisi yang telah ditentukan. Fungsi ini memiliki domain vektor posisi x dengan keluaran berupa nilai tertentu yang menunjukkan seberapa baik vektor posisi x . makin baik nilainya, makin dekat posisi tersebut dengan solusi. Dengan fungsi ini, posisi-posisi yang telah ditemukan bisa dibandingkan kedekatannya dengan solusi yang dicari. Fungsi *fitness* berbeda pada tiap-tiap permasalahan bergantung pada masalah yang dihadapi.

2.6 Pengendali PSO-PID

Kontroler PSO-PID untuk *plant* ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Struktur kontroler PSO-PID dengan indeks performansi ITAE

Untuk mengestimasi parameter PID dapat digunakan indeks performansi (Solihin, 2011)

IAE (*integral absolute error*)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.21)$$

ISE (*integral of square error*)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2.22)$$

ITAE (*integral of time weight absolute error*)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2.23)$$

ITSE (*integral of time weight square error*)

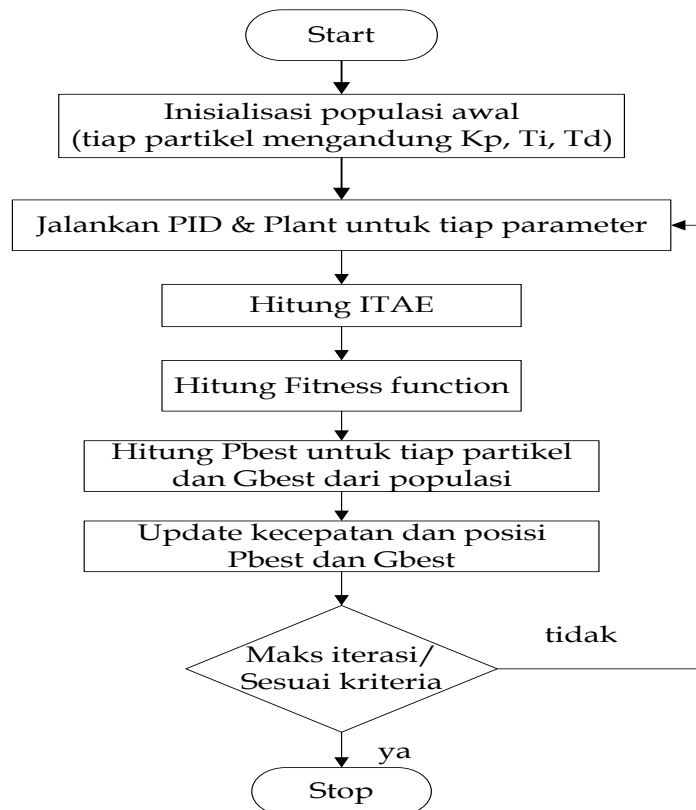
$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (2.24)$$

Fungsi obyektif atau *fitness function* dalam penelitian ini menggunakan indeks performansi ITAE. Ini dilakukan karena ITAE dapat menghasilkan kontroler yang mampu menolak gangguan beban yang tinggi dan dapat meminimalisir overshoot sistem sehingga bisa menjaga ketahanan sistem (Patra J. dkk, 2013). indeks performansi ITAE merupakan kriteria performansi yang populer digunakan untuk desain sistem kontrol. Persamaan 2.25 merupakan fungsi obyektif atau *fitness function* dengan indeks performansi ITAE.

$$J(i) = \alpha \cdot \text{indeksperform} + \beta \cdot |O(i)| \quad (2.25)$$

Dimana α, β : factor improvement dan O : overshoot

Diagram alir untuk memperoleh nilai parameter kontroler PID dengan algoritma PSO atau PID auto tuning menggunakan PSO ditunjukkan Gambar 2.9.



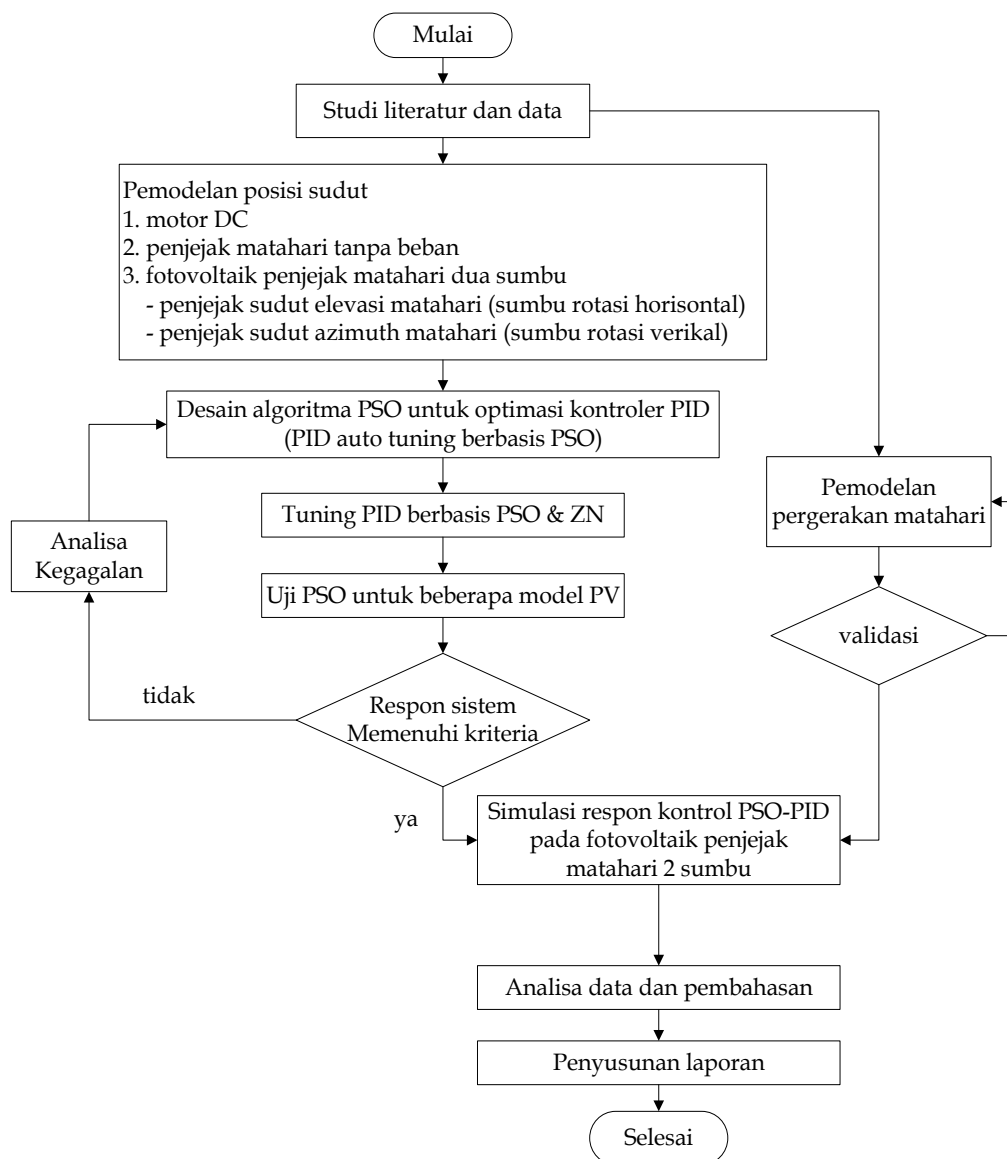
Gambar 2.9 Diagram alir PID auto tuning berbasis PSO

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Alur Penelitian

Diagram alir perancangan sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Penjelasan diagram alir penelitian yang ditunjukkan Gambar 3.1 adalah pertama studi literatur yang meliputi pemahaman tentang *sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu*, kontrol PID, penalaan PID dengan ZN, algoritma PSO, dan kontrol PSO-PID. Data yang dikumpulkan berupa parameter motor DC (momen inersia, konstanta gesek, konstanta *emf*, konstanta torsi, resistansi dan induktansi), parameter gear (massa dan diameter), serta parameter beberapa model photovoltaic (massa dan dimensi).

Kedua melakukan pemodelan sistem yang meliputi pemodelan posisi sudut motor DC, posisi sudut gear paling ujung dari perpaduan motor DC dengan transmisi sistem gear (dasar penjejak matahari), dan pemodelan posisi sudut sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu. sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu terdiri dari sumbu putar vertical (*vertical rotating-axis*) dan sumbu putar horisontal.

Ketiga mendesain algoritma PSO untuk optimasi parameter PID atau perancangan kontroler PSO-PID yang mampu mengendalikan posisi sudut sistem.

Keempat menala parameter PID (K_p , K_i , K_d) menggunakan desain algoritma PSO dan metode dua Ziegler Nichols untuk masing-masing model sistem yang diperoleh dari langkah kedua dengan menggunakan Matlab. Jika parameter PID yang diperoleh dengan menggunakan PSO lebih bagus dari metode dua Ziegler Nichols, maka lanjut ke langkah kelima. jika kejadian sebaliknya, maka kembali ke langkah ketiga.

Kelima pengujian atau penerapan desain algoritma pada *sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu* dengan beban PV yang berbeda. Jika respon performansi sistem tidak memenuhi kriteria sistem kendali, maka kembali ke langkah ketiga dengan mengevaluasi kembali langkah-langkah yang telah dilakukan. Sebaliknya, jika respon performansi sistem sesuai yang diharapkan, maka lanjut ke langkah berikutnya. Keenam analisa dan pembahasan serta terakhir penyusunan laporan.

3.2. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

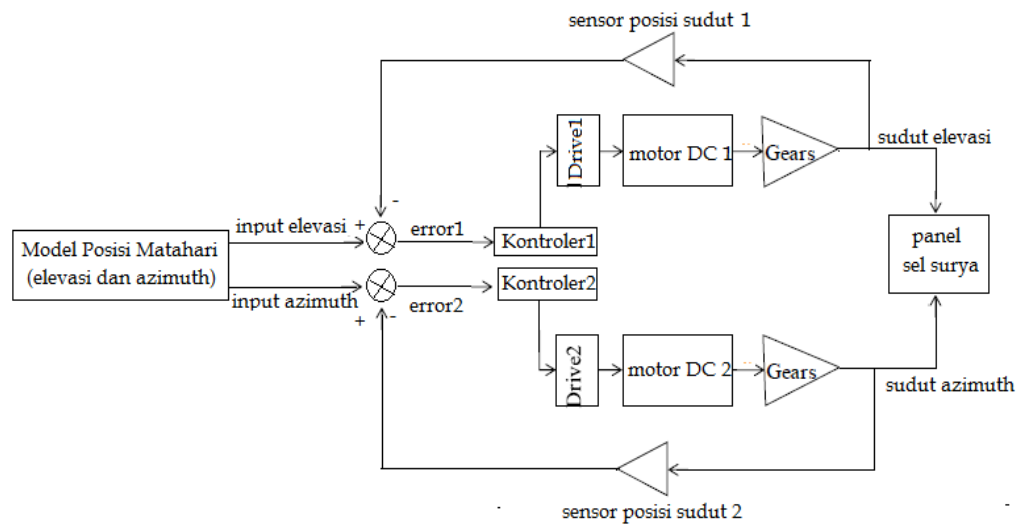
Studi literatur meliputi *review* jurnal, paper, atau sumber lain yang mendukung tema penelitian yaitu terkait sistem penjejak matahari, pemodelan sistem, kontrol PID, penalaan PID secara konvensional, algoritma particle swarm optimization (PSO), dan kriteria performansi sistem kontrol.

Data parameter masing-masing komponen penyusun sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu sangat penting dalam pembuatan model sistem. Data diperoleh dari berbagai sumber.

- Parameter motor DC dari hasil eksperimen Carnegie Mellon's undergraduate controls lab. Dimana $J = 3.2284 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$, $b = 3.5077 \times 10^{-6} \text{ N.m.s}$, $K_b = 0.0274 \frac{\text{V.sec}}{\text{rad}}$, $K_t = 0.0274 \frac{\text{N.m}}{\text{Amp}}$, $R = 4 \Omega$, dan $L = 2.75 \times 10^{-6} \text{ H}$ (Khushboo Sao dkk 2015).
- Sistem transmisi gear adalah *spur gear* terdiri dari dua gear yaitu model M1B12 (jumlah gigi 12, massa 10 gr) dan model M1A20 (jumlah gigi 120, massa 1,32 kg)
(sumber: PTI Catalog, Gear and Gear Rack Basics http://mdmetric.com/p-rod/ptic/375_PTIC_CATALOG.pdf, page 376)
- Photovoltaic sebagai beban sistem penjejak matahari sebanyak lima panel sel surya yang diproduksi khusus untuk zona Indonesia.
 - STM5 : dimensi 304x218x30 mm, dengan massa 1,2 kg
 - STM10 : dimensi 290x290x17 mm, dengan massa 1,4 kg
 - STM20 : dimensi 545x361x30 mm, dengan massa 3 kg
 - STM30 : dimensi 450x545x30 mm, dengan massa 3,5 kg
 - STM40-50 : dimensi 637x545x35 mm, dengan massa 4,5 kg(sumber: <http://www.sky-energy.co.id/type-monocrystalline/>)

3.3. Desain Sistem Kontrol PSO-PID pada Sistem Fotovoltaik Penjejak Matahari Dua Sumbu

Sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu yang dirancang ditunjukkan dalam Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Desain sistem kontrol pada sistem pv penjejak matahari dua sumbu

Berdasarkan Gambar 3.2, sistem kontrol pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu merupakan sistem kontrol MIMO, dalam hal ini dua input dua output. Hal ini terjadi karena pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu terdiri dari dua model persamaan akibat perbedaan momen inersia pada perputaran panel sel surya secara horisontal dan secara vertikal. Pemodelan sistem Gambar 3.2 diuraikan dalam subbab 3.4 sampai dengan subbab 3.9. Karena perancangan sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu ini dilakukan secara simulasi, maka bagian Drive1, Drive2, sensor posisi sudut 1, dan sensor posisi sudut 2 dapat diabaikan (tidak dimodelkan).

3.4. Pemodelan Motor DC

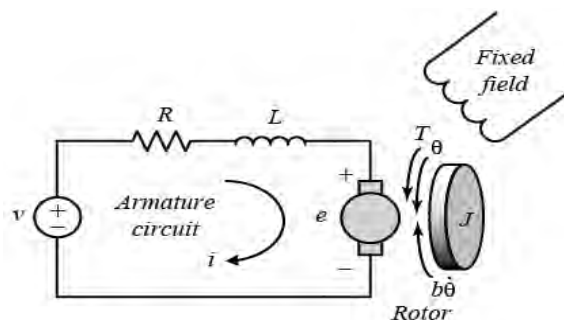
Untuk merancang sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu diperlukan fungsi sistem atau model sistem yang akan dikendalikan. Hal ini harus dilakukan karena algoritma PSO dalam mengoptimasi parameter PID butuh waktu iterasi, sehingga algoritma PSO tidak

bisa diterapkan secara langsung pada *real plant*. Penalaan parameter kontrol PID dengan algoritma PSO untuk sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MatLab.

Untuk memodelkan sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu diawali dengan memodelkan motor DC sebagai penggerak, dilanjutkan model penjejak matahari tanpa beban, dan terakhir pemodelan sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu dengan beban beberapa model fotovoltaik.

Berdasarkan Gambar 2.2 (penjejak matahari dua sumbu), kedua perputaran sumbu masing-masing digerakkan oleh dua motor DC yang berbeda. Dalam penelitian ini kedua motor DC yang digunakan sejenis. Pemodelan motor DC cukup diwakili satu pemodelan.

Rangkaian ekuivalen listrik dari dinamo dan rotor sebuah motor DC ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Motor DC (Khushboo Sao dkk 2015)

Parameter-parameter motor DC: momen inersia (J), konstanta viskositas gesek motor (b), konstanta gaya gerak listrik (K_b), konstanta torsi motor (K_t), resistensi (R), dan induktansi (L). Input dari sistem ini adalah sumber tegangan (V), sedangkan output adalah posisi poros (θ). Rotor dan poros diasumsikan *rigid*. Torsi gesekan sebanding dengan kecepatan sudut poros.

Secara umum, torsi yang dihasilkan oleh motor DC adalah sebanding dengan arus armature dan medan magnet. Dengan mengasumsikan bahwa medan

magnet konstan dan bahwa torsi motor sebanding dengan arus i dengan faktor konstan K_t seperti yang ditunjukkan dalam persamaan di bawah ini.

$$T = K_t i \quad (3.1)$$

Emf balik, e , sebanding dengan kecepatan sudut poros dengan faktor konstan K_b .

$$e = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (3.2)$$

Dalam satuan SI, torsi motor dan constant emf balik adalah sama, yaitu, $K_t = K_b$; Oleh karena itu, kita akan menggunakan K untuk mewakili kedua konstanta torsi motor dan konstanta emf balik.

Dari Gambar 3.3 di atas, berdasarkan hukum Newton kedua dan hukum tegangan Kirchhoff kita dapat memperoleh persamaan berikut.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = K i \quad (3.3)$$

$$L \frac{di}{dt} + R i = V - K \frac{d\theta}{dt} \quad (3.4)$$

Dengan menerapkan transformasi Laplace, persamaan pemodelan di atas dapat dinyatakan dalam variabel s .

$$J s^2 \theta(s) + b s \theta(s) = K I(s) \quad (3.5)$$

$$L s I(s) + R I(s) = V(s) - K s \theta(s) \quad (3.6)$$

Dimana simbol s adalah operator laplace. Dari persamaan (3.6), dapat dinyatakan ,

$$I(s) = \frac{V(s) - K s \theta(s)}{L s + R} \quad (3.7)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.7) ke dalam persamaan (3.5) diperoleh persamaan.

$$J s^2 \theta(s) + b s \theta(s) = K \frac{V(s) - K s \theta(s)}{L s + R} \quad (3.8)$$

Dari persamaan (3.8) dapat dirubah menjadi

$$Js^2\theta(s) + bs\theta(s) = \frac{KV(s) - K^2s\theta(s)}{Ls + R} \quad (3.9)$$

$$(Js + b)s\theta(s) = \frac{KV(s) - K^2s\theta(s)}{Ls + R} \quad (3.10)$$

$$(Js + b)(Ls + R)s\theta(s) = KV(s) - K^2s\theta(s) \quad (3.11)$$

$$(Js + b)(Ls + R)s\theta(s) + K^2s\theta(s) = KV(s) \quad (3.12)$$

$$\{(Js + b)(Ls + R) + K^2\}s\theta(s) = KV(s) \quad (3.13)$$

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{\{(Js + b)(Ls + R) + K^2\}s} \quad (3.14)$$

Dengan mensubstitusi nilai parameter J, b, K, R, dan L ke dalam persamaan (3.14) diperoleh model motor DC,

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{0.0274}{8.878 \times 10^{-12} s^3 + 1.291 \times 10^{-5} s^2 + 0.0007648 s} \quad (3.15)$$

Persamaan diferensial di atas juga dapat dinyatakan dalam bentuk ruang keadaan, dimana tegangan dinamo V sebagai input dan posisi rotasi θ sebagai output dan dengan memilih posisi motor θ , kecepatan motor $\dot{\theta}$ dan arus i sebagai variabel keadaan. Adapun masing-masing turunan pertama dari variable keadaan,

✓ posisi motor θ , $\frac{d}{dt}\theta = \dot{\theta} \quad (3.16)$

✓ kecepatan motor $\dot{\theta}$, dari persamaan 3.3, didapat

$$\frac{d}{dt}\dot{\theta} = -\frac{b}{J}\dot{\theta} + \frac{K}{J}i \quad (3.17)$$

✓ arus i , dari persamaan 3.4, diperoleh

$$\frac{di}{dt} = -\frac{K}{L}\dot{\theta} - \frac{R}{L}i + \frac{V}{L} \quad (3.18)$$

Dari persamaan 3.16 s/d 3.18 diperoleh persamaan ruang keadaan

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ 0 & -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V \quad (3.19)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

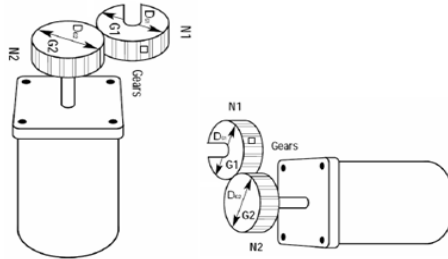
Dan dengan substitusi nilai parameter motor DC, diperoleh

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1.087 & 8487 \\ 0 & -9964 & -1.455 \times 10^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.636 \times 10^5 \end{bmatrix} V \quad (3.21)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

3.5. Pemodelan Penjejak Matahari tanpa Beban

Yang dimaksud penjejak matahari tanpa beban adalah motor DC yang terkoneksi dengan transmisi gear tanpa beban panel sel surya. Dalam penelitian ini juga digunakan model gear yang sama untuk kedua sistem penjejak matahari, baik untuk sumbu rotasi vertikal maupun untuk sumbu rotasi horisontal.



Gambar 3.4 Ilustrasi penjejak matahari tanpa beban

Gear₁ atau gear luar yang dipakai adalah model M1B12 (jumlah gigi N₁=12, m_{g1}=10 gr) sementara gear₂ dipakai model M1A20 (jumlah gigi N₂=120, m_{g2}=1,32 kg). Koneksi antara rotor motor DC dengan sistem transmisi gear menambah momen inersia bagi motor DC.

Momen inersia gear1

$$J_{G1} = \frac{1}{8} m_{G1} D_{G1}^2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (3.23)$$

$$J_{G1} = \frac{1}{8} (1.32) \cdot (0,12)^2 \left(\frac{12}{120} \right)^2 = 2.376 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$$

Momen inersia gear2

$$J_{G2} = \frac{1}{8} m_{G2} D_{G2}^2 \text{ [kg.m}^2\text{]} \quad (3.24)$$

$$J_{G2} = \frac{1}{8} (0.01) \cdot (0.012)^2 = 1.8 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^2$$

Momen inersia penjejak matahari tanpa photovoltaic

$$J_{st} = J_M + J_{G1} + J_{G2} \quad (3.25)$$

$$J_{st} = 3.2284 \times 10^{-6} + 2.376 \times 10^{-5} + 1.8 \times 10^{-7} = 2.71684 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$$

Rasio kecepatan sudut putar

$$wR = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.26)$$

$$wR = \frac{12}{120} = 0.1$$

Fungsi transfer sistem penjejak matahari tanpa beban diperoleh dari persamaan (3.14) dengan nilai $J=J_{TnoPV}$ dan dikalikan dengan rasio kecepatan sudut wR

$$FT_{st} = \frac{\theta(s)}{V(s)} = wR \cdot \frac{K}{s \left((J_{st}s+b)(Ls+R)+K^2 \right)} \quad (3.27)$$

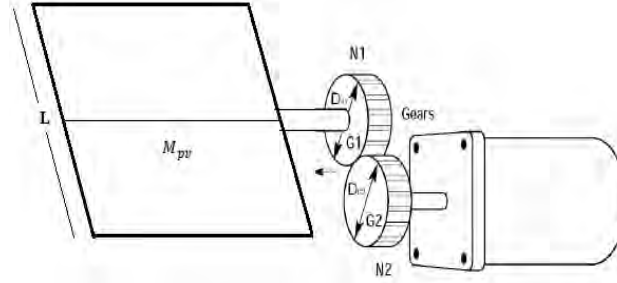
$$FT_{st} = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{0.00274}{7.471 \times 10^{-11} s^3 + 0.0001087 s^2 + 0.0007648 s} \quad (3.28)$$

3.6. Pemodelan Sistem Fotovoltaik Penjejak Matahari dua Sumbu

Sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu merupakan penjejak matahari dengan beban panel sel surya dan digerakkan dalam dua sumbu putar yaitu sumbu putar vertikal dan sumbu putar horisontal. sumbu putar vertikal berguna untuk mengikuti arah sudut tahunan matahari (*azimuth*), sedangkan sumbu putar horisontal dimaksudkan untuk mengikuti arah sudut harian matahari (*elivation*) dari timur ke barat.

3.6.1. Pemodelan Fotovoltaik Penjejak Matahari Sumbu Putar Horisontal

Secara mekanik sistem penjejak matahari sumbu putar horisontal ditunjukkan dalam Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.5 Ilustrasi penjejak matahari sumbu putar horisontal

Dari Gambar 3.5 diatas, beban photovoltaic diputar sepanjang sumbu x-x tepat ditengah dimensi panjang L. Nilai torsi beban fotovoltaik diperoleh dari momen inersia panel sel surya dikalikan dengan percepatan sudut putar. Percepatan sudut putar berasal dari percepatan sudut gear1.

Momen inersia panel sel surya sumbu putar horisontal

$$J_1 = \frac{1}{12} m_{pv} L^2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad [kg.m^2] \quad (3.29)$$

Momen inersia penjejak matahari sumbu putar horisontal

$$J_{T1} = J_{st} + J_1 \quad [kg.m^2] \quad (3.30)$$

$$J_{T1} = 2.71684 \times 10^{-5} + J_1 \quad [kg.m^2] \quad (3.31)$$

Hasil hitungan lengkap nilai momen inersia panel sel sumbu putar horisontal J_1 dan momen total inersia penjejak matahari sumbu putar horisontal J_{T1} untuk kelima model panel sel surya yang digunakan ditunjukkan dalam table berikut.

Tabel 3.1 Hasil perhitungan momen inersia total sumbu putar horisontal

No	model	Pmax (W)	L.W.H (mm)	Weight (kg)	L (m)	J1 (kg.m2)	JT1 (kg.m2)
1	STM5	5	304x218x30	1.2	0.304	9.242E-05	0.0001196
2	STM10	10	290x290x17	1.4	0.29	9.812E-05	0.0001253
3	STM20	20	545x361x30	3	0.545	0.0007426	0.0007697
4	STM30	30	450x545x30	3.5	0.45	0.0005906	0.0006178
5	STM40-50	40-50	637x545x35	4.5	0.637	0.0015216	0.0015488

Fungsi transfer sistem penjejak matahari sumbu putar horisontal diperoleh dari persamaan (3.14) dengan nilai $J=J_{T1}$ dan dikalikan dengan rasio kecepatan sudut wR

$$FT_{inc} = \frac{\theta(s)}{V(s)} = wR \cdot \frac{K}{s((J_{T1}s+b)(Ls+R)+K^2)} \quad (3.32)$$

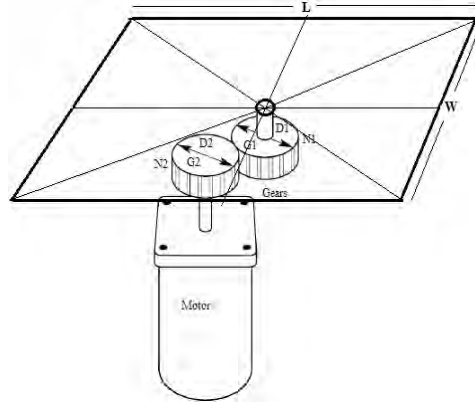
Fungsi transfer penjejak matahari sumbu putar horisontal untuk masing-masing model panel sel surya ditunjukkan dalam Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Fungsi transfer *solar tracker* sumbu putar horisontal tiap model PV

No	Model pv	$FT_{inc} = \frac{\theta(s)}{V(s)}$	No pers.
1	STM5	$\frac{0.00274}{3.289 \times 10^{-10} s^3 + 0.0004783 s^2 + 0.0007648 s}$	(3.33)
2	STM10	$\frac{0.00274}{3.445 \times 10^{-10} + s^3 + 0.0005011 s^2 + 0.0007648 s}$	(3.34)
3	STM20	$\frac{0.00274}{2.117 \times 10^{-9} s^3 + 0.003079 s^2 + 0.0007648 s}$	(3.35)
4	STM30	$\frac{0.00274}{1.699 \times 10^{-9} s^3 + 0.002471 s^2 + 0.0007648 s}$	(3.36)
5	STM40-50	$\frac{0.00274}{4.259 \times 10^{-9} s^3 + 0.006195 s^2 + 0.0007648 s}$	(3.37)

3.6.2. Pemodelan Fotovoltaik Penjejak Matahari Sumbu Putar vertikal (*Vertical Rotating-Axis*)

Secara mekanik sistem *vertical rotating-axis PV rolar tracker* ditunjukkan dalam Gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Ilustrasi penjejak matahari sumbu putar vertikal

Dari Gambar 3.6 diatas, beban fotovoltaik diputar tepat ditengah dimensi panjang $L \times W$. Nilai torsi beban fotovoltaik diperoleh dari momen inersia panel sel surya dikalikan dengan percepatan sudut putar. Percepatan sudut putar berasal dari percepatan sudut gear1.

Momen inersia panel sel surya *vertical rotating-axis*

$$J_2 = \frac{1}{2} m_{pv} (L^2 + W^2) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad [kg.m^2] \quad (3.38)$$

Momen inersia *vertical rotating-axis PV rolar tracker*

$$J_{T2} = J_{st} + J_2 \quad [kg.m^2] \quad (3.39)$$

$$J_{T2} = 2.71684 \times 10^{-5} + J_2 \quad [kg.m^2] \quad (3.40)$$

Hasil hitungan lengkap nilai momen inesia *vertical rotating-axis* panel sel J_1 dan momen inersia *vertical rotating-axis* total J_{T1} untuk kelima model panel sel surya yang digunakan ditunjukkan dalam table berikut.

Tabel 3.3 Hasil perhitungan momen inersia total sumbu putar vertikal

No	model	L.W.H (mm)	Weight (kg)	L (m)	W (m)	J2 (kg.m2)	JT2 (kg.m2)
1	STM5	304x218x30	1.2	0.304	0.218	0.0008396	0.0008668
2	STM10	290x290x17	1.4	0.29	0.29	0.0011774	0.0012046
3	STM20	545x361x30	3	0.545	0.361	0.0064102	0.0064374
4	STM30	450x545x30	3.5	0.45	0.545	0.0087417	0.0087689
5	STM40-50	637x545x35	4.5	0.637	0.545	0.0158129	0.01584

Fungsi transfer sistem *vertical rotating-axisPV rolar tracker* diperoleh dari persamaan (3.14) dengan nilai $J=J_{T2}$ dan dikalikan dengan rasio kecepatan sudut wR

$$FT_{vert} = \frac{\theta(s)}{V(s)} = wR \cdot \frac{K}{s((J_{T2}s+b)(Ls+R)+K^2)} \quad (3.41)$$

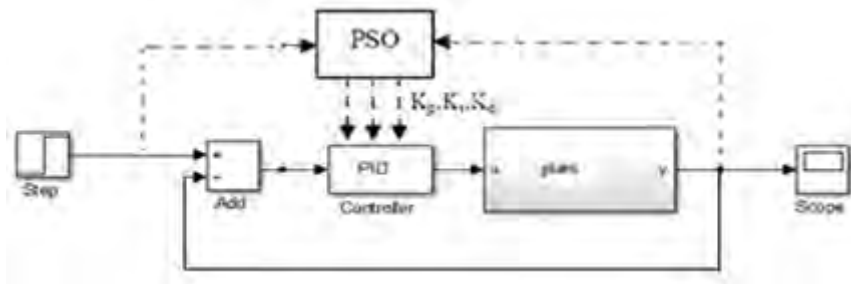
Fungsi transfer *vertical rotating-axis pv rolar tracker* untuk masing-masing model panel sel surya ditunjukkan dalam Tabel berikut

Tabel 3.4 Fungsi transfer *solar tracker* sumbu putar vertikal tiap model PV

No	Model pv	$FT_{vert} = \frac{\theta(s)}{V(s)}$	No pers.
1	STM5	$\frac{0.00274}{2.384 \times 10^{-9} s^3 + 0.003467 s^2 + 0.0007648 s}$	(3.42)
2	STM10	$\frac{0.00274}{3.313 \times 10^{-9} s^3 + 0.004818 s^2 + 0.0007648 s}$	(3.43)
3	STM20	$\frac{0.00274}{1.77 \times 10^{-8} s^3 + 0.02575 s^2 + 0.0007648 s}$	(3.44)
4	STM30	$\frac{0.00274}{2.411 \times 10^{-8} s^3 + 0.03508 s^2 + 0.0007648 s}$	(3.45)
5	STM40-50	$\frac{0.00274}{4.356 \times 10^{-8} s^3 + 0.06336 s^2 + 0.0007648 s}$	(3.46)

3.7. Perancangan Sistem kontrol PSO-PID

Sistem kontrol PSO-PID dilakukan dengan cara mencari parameter PID (K_p , K_i , K_d) menggunakan algoritma PSO secara simulasi dalam MATLAB. Proses penalaan parameter PID dengan menggunakan algoritma PSO untuk *plant* ditunjukkan Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7 Struktur kontroler PSO-PID

Adapun langkah langkah perancangan sistem kontrol PID sebagai berikut.

- ✓ Memodelkan plant atau sistem yang akan dikontrol

Dalam penelitian ini plant dimodelkan dalam bentuk fungsi transfer sebagaimana telah dibahas pada sub bab sebelumnya.

- ✓ Menentukan fungsi fitness atau fungsi tujuan

Fungsi tujuan metode desain kontroler PID yang dipilih dalam penelitian ini menggunakan kriteria performansi *integral of time-weighted absolute error* (ITAE), $ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$

- ✓ Menentukan fungsi batas optimasi

Fungsi batas adalah kriteria minimal yang harus dicapai oleh algoritma PSO yang diinginkan. Kriteria fungsi batas dalam penelitian ini adalah *settling time* performansi sistem dari kontroler Ziegler Nichols.

- ✓ Menyusun algoritma PSO-PID, menentukan parameter-parameter PSO.

Algoritma PSO-PID ditunjukkan dalam Gambar (2.8 dan 2.9). Adapun parameter-parameter PSO yang digunakan sebagai berikut.

- Dimensi, d : 3 (mewakili K_p , T_i , dan T_d)
- Jumlah partikel, N : 40

- Maksimal iterasi, I : 100
- Batas atas Kp, Ti, Td : 100, 5, 5
- Batas bawah Kp, Ti, Td : 0, 0, 0
- Konstanta akselerasi, C1 : 1,2
- Konstanta akselerasi, C2 : 0,9
- Faktor bobot, w : $w_{\max}=0,9$; $w_{\min}=0,4$ yang bervariasi sesuai

```

for i=1:maxit
    rho(i)=  $w_{\max} - ((w_{\max} - w_{\min})/\text{maxit}) * i$ ;
end

```

✓ Melakukan penalaan.

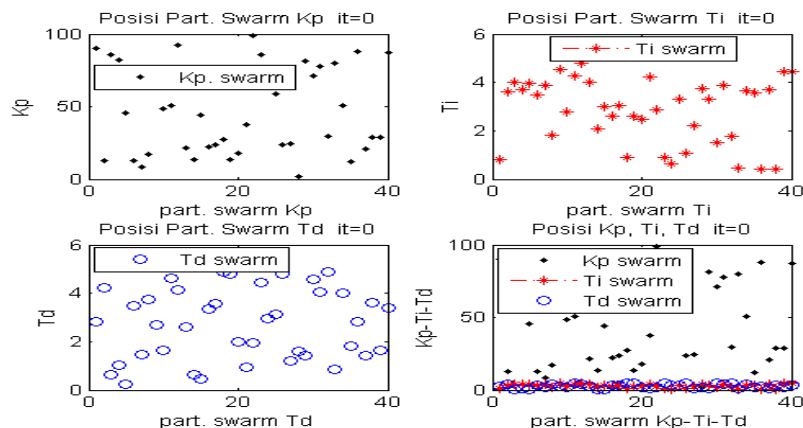
Penalaan dilakukan dengan memberikan input step pada sistem sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3.7 diatas. Garis putus-putus menunjukkan proses penalaan. Setelah diperoleh nilai parameter PID, garis putus-putus sudah dipakai lagi.

3.8. Proses Penalaan Kp, Ki, Kd dengan Algoritma PSO

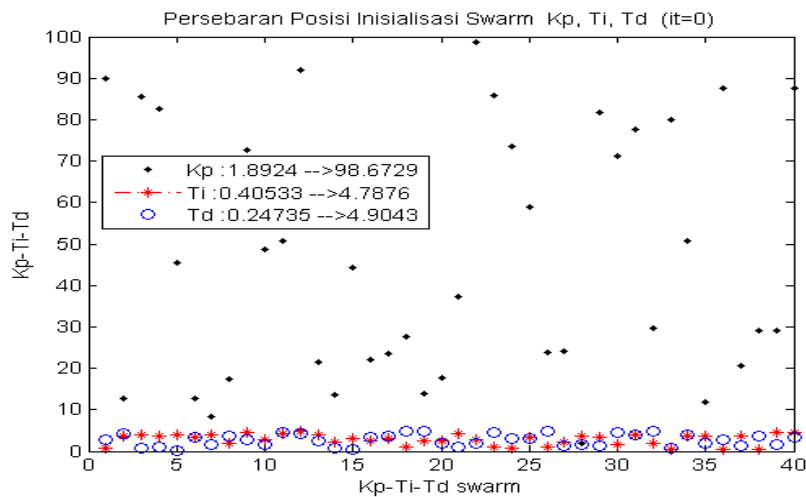
Pada bagian ini dibahas proses penalaan parameter PID dengan algoritma PSO dan respon motor DC dengan kontroler PSO-PID yang dihasilkan. Berikut ini adalah Gambaran dan penjelasan proses penalaan parameter PID dengan algoritma PSO.

➤ Inisialisasi

40 Partikel swarm diinisialisasi, dimana tiap partikel memiliki 3 nilai (Kp, Ti, dan Td) dan itu adalah posisi awal seperti yang ditunjukkan Gambar 3.8. Posisi awal merupakan Pbest bagi tiap partikel hingga iterasi berikutnya.



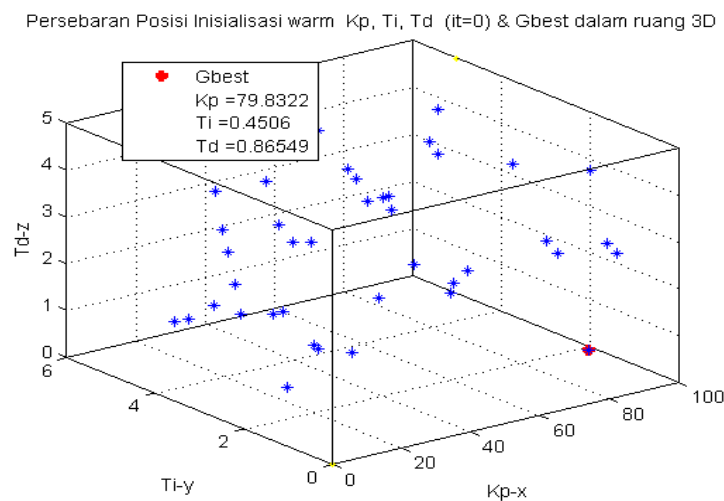
Gambar 3.8 Inisialisasi swarm sebanyak 40 partikel



Gambar 3.9 Persebaran partikel swarm

➤ Menentukan nilai Gbest

Secara bergantian tiap partikel inisialisasi dengan ketiga nilai yang dimiliki masuk sebagai kontroler PID, menghasilkan nilai performansi sistem kontrol. Partikel yang menghasilkan nilai ITAE terkecil merupakan Gbest saat itu dan menjadi acuan bagi pergerakan posisi partikel lain pada iterasi berikutnya.

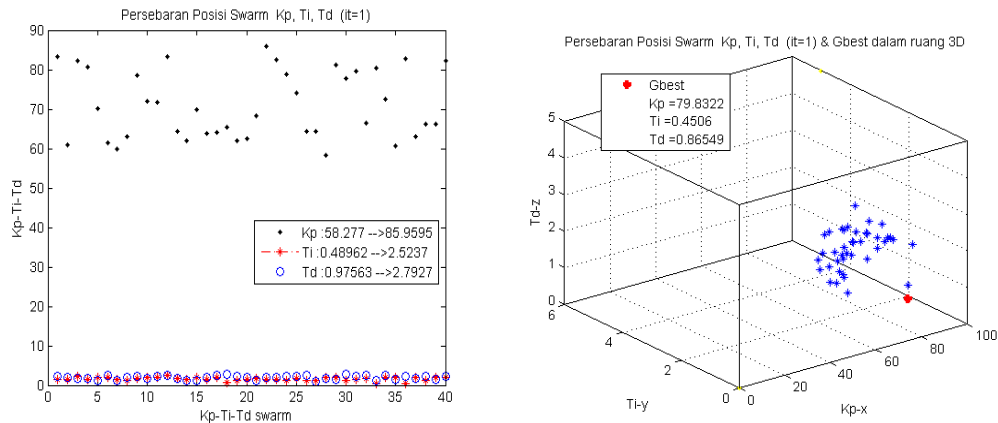


Gambar 3.10 Posisi partikel swarm inisialisai dan posisi Gbest dalam 3D

➤ Iterasi dan update posisi

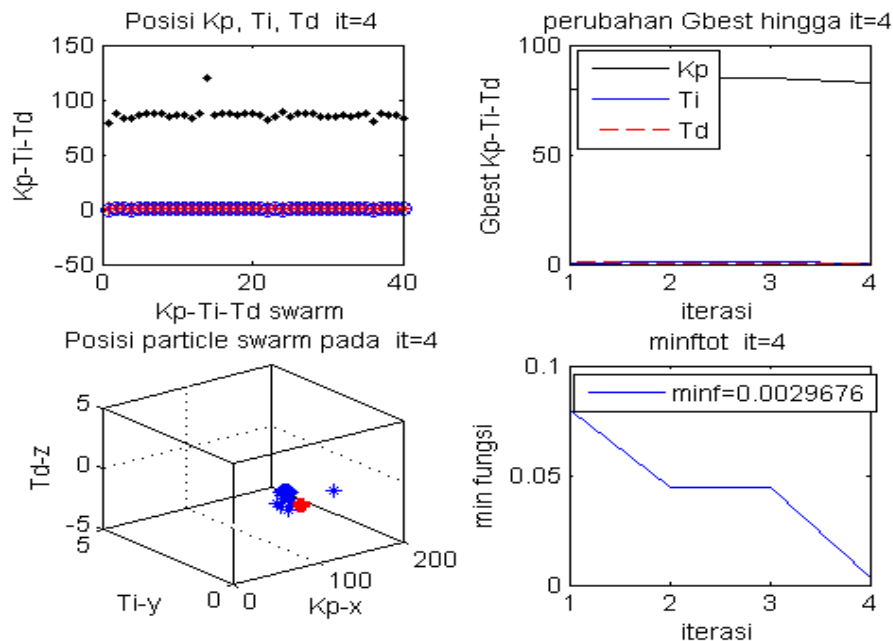
Dengan diketahui nilai Pbest untuk tiap partikel dan nilai Gbest sebagai acuan pergerakan, pada iterasi berikutnya tiap partikel berubah posisi (K_p , T_i ,

Td). Posisi ini digunakan mencari nilai ITAE minimal. Demikian seterusnya sampai mencapai criteria yaitu $T_s < 0.006\text{det}$ dan $t_p < 0,05\text{det}$.

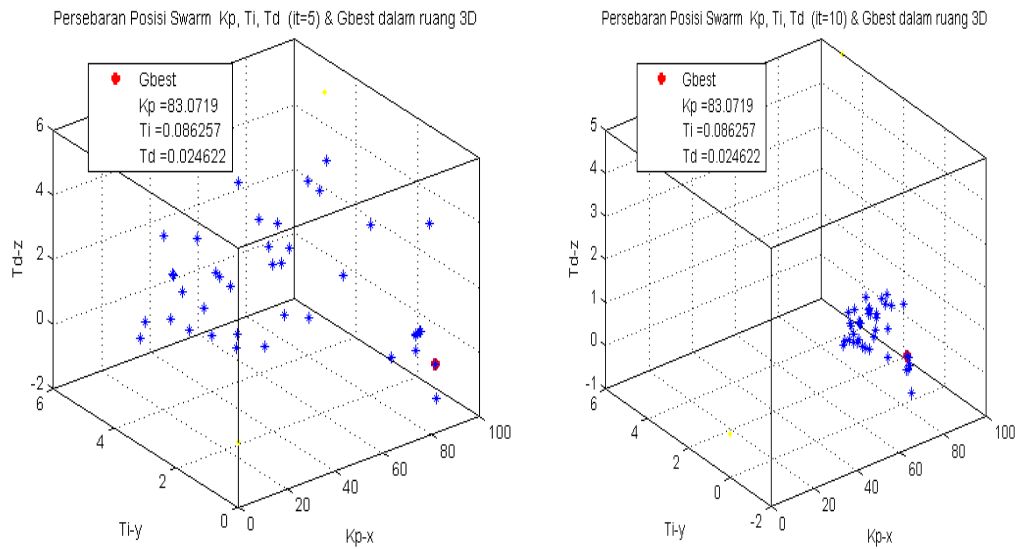


Gambar 3.11 Persebaran partikel swarm dan posisi Gbest pada iterasi-1

Sampai iterasi keempat, Gbest mengalami perbaikan (*update*) tiga kali, yaitu pada iterasi pertama, iterasi kedua, dan iterasi keempat. Sementara pada iterasi ketiga tidak terjadi *update* Gbest, hanya terjadi pergerakan posisi swarm. Ini terjadi sampai iterasi kesembilanbelas, seperti ditunjukkan Gambar 3.13 s/d Gambar 3.17 serta Tabel 3.5.

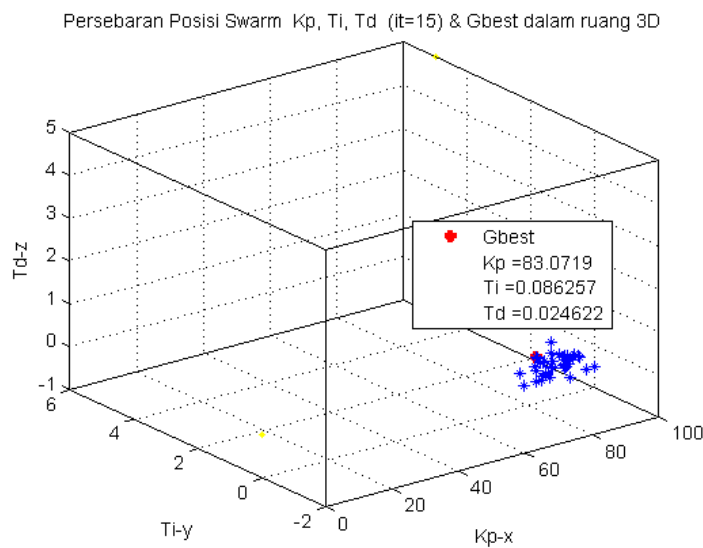


Gambar 3.12 Posisi partikel swarm dan pergerakan fungsi minimal pada iterasi-4

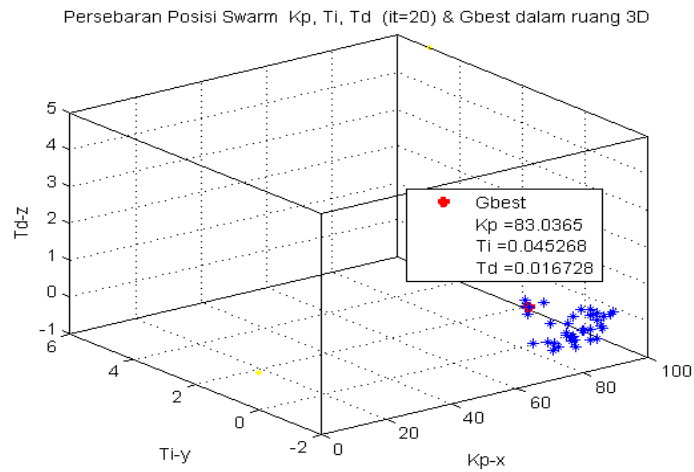


Gambar 3.13 Posisi partikel swarm dan Gbest 3D pada iterasi 5 dan 10

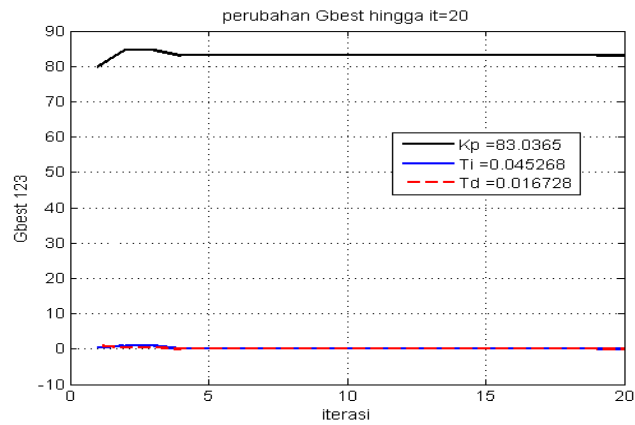
Berdasarkan Gambar 3.13 posisi partikel swarm dalam ruang (3D) pada iterasi kelima, iterasi kesepuluh, dan iterasi kelima belas terlihat bahwa partikel swarm selalu bergerak, namun nilai Gbest sama. Hal ini sering terjadi pada PSO yang terjebak pada nilai minimal fungsi tujuan, bahkan jika tidak dilakukan perbaikan pada PSO, nilai minimal fungsi tujuan bisa naik, yang artinya nilai optimal Gbest makin jelek dan tidak ditemukan nilai optimal Gbest.



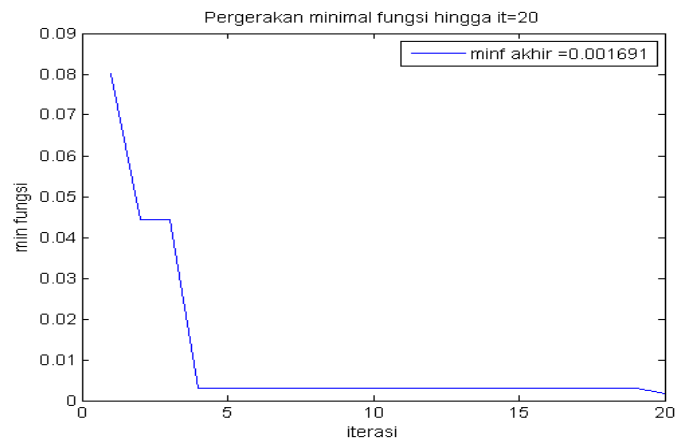
Gambar 3.14 Posisi partikel swarm dan Gbest dalam 3D pada iterasi-15



Gambar 3.15 Posisi partikel swarm dan Gbest dalam 3D pada iterasi-20



Gambar 3.16 Perubahan nilai Gbest sampai iterasi-20



Gambar 3.17 Perubahan nilai minimal fungsi tujuan sampai iterasi-20

Berdasarkan Gambar 3.17 di atas, terlihat nilai minimal fungsi tidak pernah naik pada iterasi berikutnya. Hal ini terjadi karena ada perbaikan algoritma PSO agar tidak terjadi kenaikan nilai minimal fungsi tujuan. Pada Gambar 3.17 juga terlihat nilai minimal fungsi tujuan terjebak tidak mengalami penurunan dari iterasi keempat sampai iterasi kesembilan belas. Keadaan ini kadang bisa lebih panjang, bahkan iterasi sampai batas iterasi maksimum tidak tercapai nilai optimal.

Tabel 3.5 Nilai Gbest (Kp, Ti, Td) dan fungsi minimal tiap iterasi

iterasi	Gbest			Fungsi minimal
	Kp best	Ti best	Td best	
1	79.832	0.4506	0.86549	0.080095
2	84.566	0.88301	0.42072	0.044337
3	84.566	0.88301	0.42072	0.044337
4	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
5	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
6	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
7	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
8	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
9	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
10	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
11	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
12	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
13	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
14	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
15	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
16	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
17	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
18	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
19	83.072	0.086257	0.024622	0.0029676
20	83.036	0.045268	0.016728	0.001691

Pencarian nilai parameter PID (Kp, Ti, Td) yang direpresenasikan Gbest dicapai dengan berhentinya iterasi pada iterasi ke-20, setelah mencapai kriteria performansi $T_s < 0.006\text{det}$ dan $t_p < 0,05\text{det}$. Algoritma PSO menghasilkan nilai $K_p=83,036$; $T_i=0,045268$ atau $K_i=1834,3$; dan $T_d=0,016728$ atau $K_d=1,389$. Dalam fungsi transfer kontroler PSO-PID ini dapat dituliskan dengan,

$$PID(s) = \frac{0.06288 s^2 + 3.759 s + 83.04}{0.04527 s} \quad (3.47)$$

Kontroler PID hasil penalaan dengan PSO ini selanjutnya disebut kontroler PSO-PID.

3.9. Pemodelan Posisi Sudut Elevasi dan Sudut Azimuth Matahari

Posisi matahari sepanjang tahun yang diukur dari suatu lokasi tertentu dipermukaan bumi selalu berubah akibat dari rotasi bumi dan pergeseran kemiringan sudut rotasi bumi terhadap sumbu putar. Pada waktu yang sama posisi matahari juga berbeda jika diukur dari lokasi yang berbeda. Posisi matahari akan sama jika diukur dari lokasi dengan bujur dan lintang yang tetap pada waktu dan tanggal yang sama, hal ini terjadi karena revolusi bumi terhadap matahari membutuhkan waktu 1 tahun. Jadi posisi matahari atau pergerakan matahari merupakan fungsi waktu dan lokasi pengukuran. Parameter waktu meliputi jam, menit, detik, tanggal dan bulan. Sedangkan parameter lokasi adalah posisi lintang posisi bujur lokasi dan zona waktu.

Posisi matahari terhadap suatu lokasi dipermukaan bumi dapat direpresentasikan dalam posisi sudut elevasi atau sudut *altitude* dan sudut *azimuth*. Berikut adalah contoh langkah perhitungan untuk menentukan posisi matahari dan informasi lain terkait matahari dengan data-data sebagai berikut

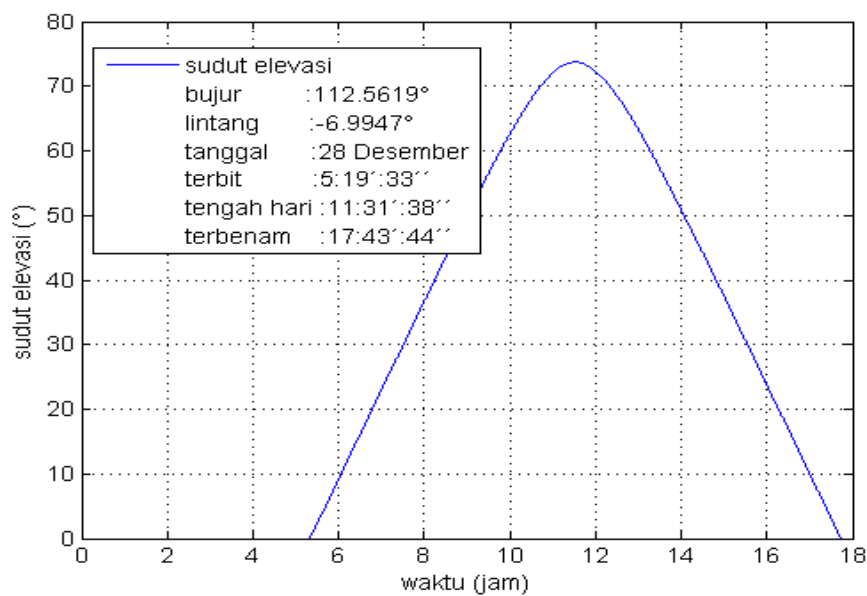
- lokasi kota Sidayu kabupaten Gresik
 - lintang selatan : $-6.99465^{\circ} = -6^{\circ} 59' 41''$
 - bujur timur : $112.562^{\circ} = 112^{\circ} 33' 43''$
- waktu : 10:00:00 WIB
- tanggal : 28 Desember 2015 $\rightarrow d=362$ hari
- beda waktu GMT : 7 jam

Berdasarkan persamaan (2.1) samapai dengan persamaan (2.13) langkah perhitungan ditunjukkan dalam Lampiran B (Perhitungan Posisi Matahari)

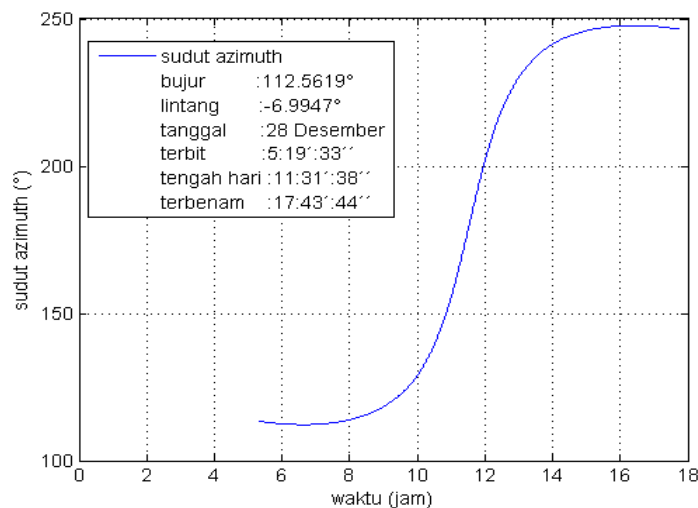
Dari proses perhitungan pada Lampiran B, diketahui bahwa pada tanggal 28 desember pukul 10:00 WIB untuk lokasi kota Sidayu kabupaten Gresik (lintang selatan -6.99465° , bujur timur 112.562° , beda waktu GMT 7jam),

diperoleh posisi sudut elevasi matahari 62.6244° , dan posisi sudut *azimuth* matahari 128.946° . Dari perhitungan diatas juga diperoleh informasi bahwa pada tanggal tersebut matahari terbit pada pukul 17 43' 44'', tengah hari pukul 11 31' 38'', matahari terbenam pada pukul 11 31' 38'', dan lama waktu matahari terlihat dikota Sidayu pada tanggal 28 desember adalah 12 24' 12''.

Posisi sudut elevasi dan sudut azimuth matahari sepanjang siang di kota Sidayu tanggal 28 desember masing-masing ditunjukkan Gambar 3.18 dan 3.19.



Gambar 3.18 Posisi sudut elevasi matahari di kota Sidayu sepanjang siang



Gambar 3.19 Posisi sudut *azimuth* matahari di kota Sidayu sepanjang siang

Berdasarkan Gambar 3.19, sudut azimuth matahari sepanjang siang di kota Sidayu pada tanggal 28 Desember bernilai diatas 90^0 dan dibawah 270^0 , ini menunjukkan posisi matahari di sebelah selatan kota Sidayu. Hal ini menyebabkan ketinggian matahari atau sudut elevasi maksimal pada tanggal 28 Desember tidak sampai 90^0 (Gambar 3.18).

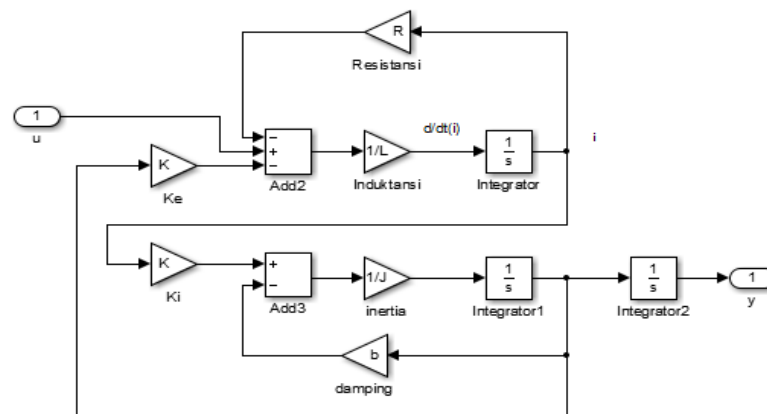
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Model Simulink Sistem

Pada bab 3 telah diperoleh model sistem dalam bentuk fungsi transfer baik untuk sistem motor DC, persamaan 3.15, penjejak matahari tanpa beban persamaan 3.28, dan sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu dengan 5 beban panel sel surya yang berbeda baik untuk sumbu putar horisontal, Tabel 3.2 maupun sumbu putar vertikal, Tabel 3.4. Semua model sistem diatas dapat dimodelkan menjadi satu model simulink, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1. Model simulink motor DC

Model simulink diatas mewakili model simulink motor DC, model simulink penjejak matahari tanpa beban, dan model simulink sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu baik untuk sumbu putar horisontal maupun sumbu putar vertikal. Nilai variabel konstanta viskositas gesek motor (b), konstanta gaya gerak listrik (K_b), konstan torsi motor (K_t), resistensi (R), dan induktansi (L) untuk masing-masing model adalah sama sebagaimana pada subbab 3.2. Yang membedakan masing-masing model adalah nilai momen inersia J . Nilai momen inersia motor DC $3.2284 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$, subbab 3.2. Nilai momen inersia penjejak matahari tanpa beban $2.71684 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$, hasil perhitungan persamaan 3.25.

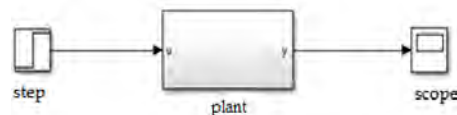
Nilai sistem fotovoltaik penjejak sudut elevasi matahari (sumbu putar horisontal) untuk masing-masing beban panel sel surya terdapat pada kolom terakhir Tabel 3.1. Sedangkan Nilai sistem fotovoltaik penjejak sudut *azimuth* matahari (sumbu putar vertikal) untuk masing-masing beban panel sel surya terdapat pada kolom terakhir Tabel 3.3.

Model sistem atau model plant baik dalam bentuk fungsi transfer maupun dalam bentuk model simulink selanjutnya ditempatkan pada blok plant sebagaimana dibahas pada subbab berikut.

4.2 Model Simulink Uji Respon

Untuk melihat respon sebuah sistem, dilakukan beberapa uji respon. Uji tanggapan atau uji respon yang dilakukan uji respon *open loop*, uji respon *close loop*, uji respon dengan sistem kontrol ZN-PID dan uji respon dengan sistem kontrol PSO-PID. Gambar-Gambar berikut adalah model simulink untuk masing-masing uji respon dengan input *step*.

- Model simulink uji respon *open loop*



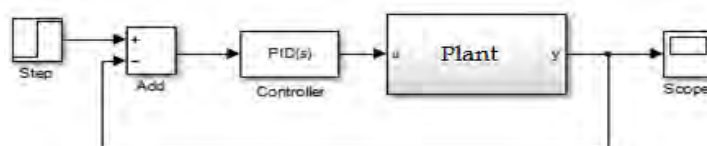
Gambar 4.2 Model simulink uji respon sistem loop terbuka

- Model simulink uji respon *close loop*



Gambar 4.3 Model simulink uji respon sistem loop tertutup

- Model simulink uji respon dengan sistem kontrol PID



Gambar 4.4 Model simulink uji respon sistem dengan sistem kontrol

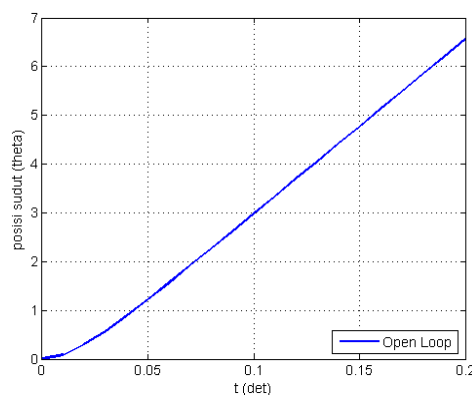
4.3 Uji Respon Motor DC

Berdasarkan pemodelan berbagai plant (motor DC, penjejak matahari tanpa beban, dan sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu dengan berbagai beban panel sel surya) yang serupa, maka pola respon akan serupa. Namun demikian, karena nilai momen untuk masing-masing berbeda, maka nilai karakteristik atau performansi juga berbeda.

Motor DC memiliki momen inersia paling kecil, $J = 3.2284 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$. Sementara sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu dengan beban pv STM40-50 memiliki momen inersia paling besar. Dimana momen inersia untuk sumbu putar horisontal $J_1 = 0.0015216 \text{ kg.m}^2$, dan momen inersia sumbu putar vertikal $J_2 = 0.0015488 \text{ kg.m}^2$, maka pada bab ini, penulis hanya menampilkan Gambar uji respon pada dua sistem/plant ini. Untuk model yang lain hanya ditampilkan hasil performansi dalam Tabel.

4.3.1 Respon *Open Loop* Motor DC

Uji respon *open loop* motor DC dengan input step dilakukan sebagaimana ditunjukkan Gambar 4.2 menghasilkan respon sebagaimana tersajikan pada Gambar 4.5.

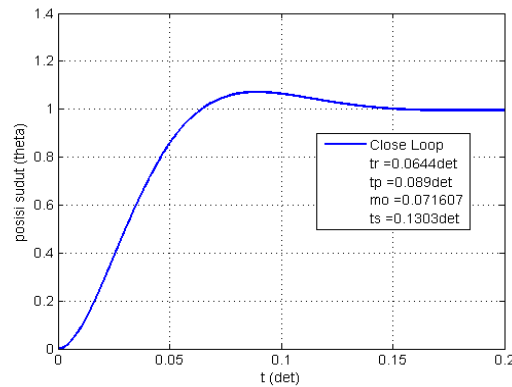


Gambar 4.5 Respon *open loop* motor DC dengan *input step*

Hasil pengujian sistem terbuka dengan *input step* memperlihatkan *output* posisi sudut berbanding lurus dengan input, kecuali 0,01 detik diawal proses. Hal ini terjadi akibat nilai konstanta damping (viskositas gesek) motor DC.

4.3.2 Respon *Close Loop* Motor DC

Pengujian ini dilakukan dengan memberika *feedback* pada sistem. Dalam hal ini tidak menggunakan kontroler sebagaimana ditunjukkan Gambar 4.3. Adapun hasil respon uji loop terbuka ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Respon pengujian sistem tertutup dengan *input step*

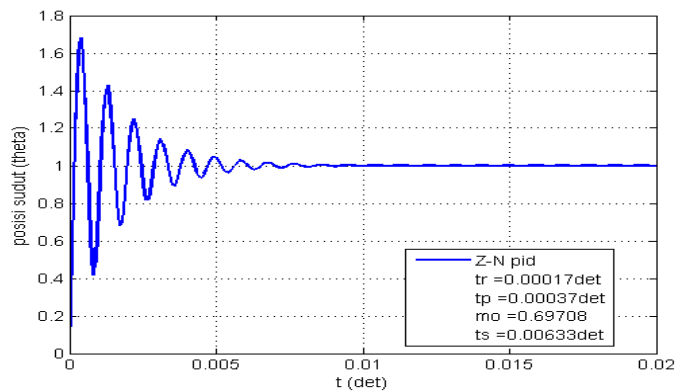
Hasil pengujian sistem tertutup dengan *input step* memperlihatkan *output* posisi sudut bisa stabil dengan karakteristik: *rise time* tr 0,0644 det, *peak time* tp 0,089 det, *max overshoot* 0,071607, *settling time* ts 0,1303 det.

4.3.3 Respon Motor DC dengan Kontroler ZN-PID

Berdasarkan aturan metode 2 aturan Ziegler Nichols pada Tabel 2.3 dan dengan menggunakan MATLAB, diperoleh nilai parameter PID: $K_p = 24360$; $K_i = 7,1967 \times 10^7$ ($T_I = 0,00033848$); dan $K_d = 2,0613$ ($T_d = 8,4621 \times 10^{-5}$). Dalam fungsi transfer kontroler ZN-PID ini dapat dituliskan dengan,

$$PID(s) = \frac{0.0006977 s^2 + 8.245 s + 2.436 \times 10^4}{0.0003385 s}$$

Kontroler PID hasil pentuningan dengan metode 2 aturan Ziegler Nichols ini selanjutnya disebut kontroler ZN-PID. Kontroler ZN-PID selanjutnya dipakai sebagai sistem kendali motor DC sebagaimana ditunjukkan Gambar 4.4. Adapun hasil uji respon DC menggunakan kontroler ZN-PID dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut.



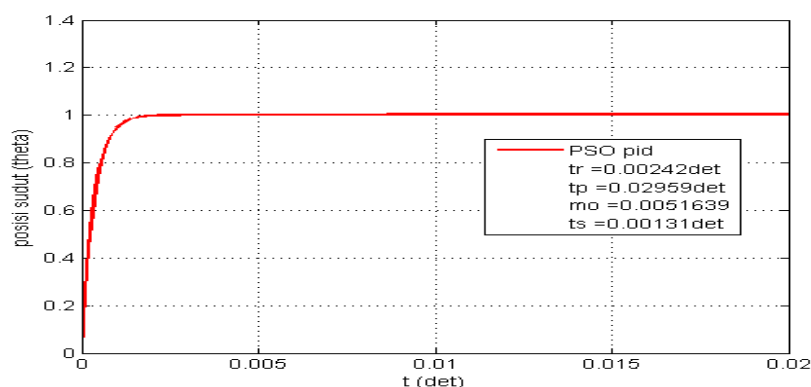
Gambar 4.7 Respon pengujian sistem menggunakan kontroler ZN-PID

Hasil pengujian sistem menggunakan kontroler ZN-PID untuk *input step* memperlihatkan performansi pengendalian posisi sudut dengan karakteristik: *rise time* t_r 0,00017 det, *peak time* t_p 0,00037 det, *max overshoot* 0,69708, dan *settling time* t_s 0,00633 det.

Sistem mencapai kestabilan lebih cepat dengan menggunakan kontroler ZN-PID dari pada sistem *close loop* tanpa kontroler, namun kontroler ZN-PID menghasilkan *maximum overshoot* yang besar dan ripple yang tinggi sebelum mencapai sistem kestabilan.

4.3.4 Respon Motor DC dengan Kontroler PSO-PID

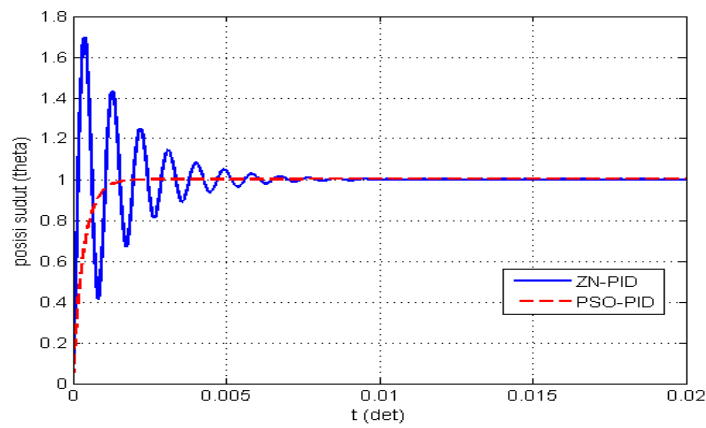
Kontroler PSO-PID selanjutnya dipakai sebagai sistem kendali motor DC sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4. Adapaun hasil uji respon DC menggunakan kontroler ZN-PID dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Respon pengujian sistem menggunakan kontroler PSO-PID

Hasil pengujian sistem menggunakan kontroler PSO-PID untuk *input step* memperlihatkan performansi pengendalian posisi sudut dengan karakteristik: *rise time* t_r 0,00242 det, *peak time* t_p 0,02959 det, *max overshoot* 0,00516393, dan *settling time* t_s 0,00131 det, ITAE 0.01691 yang dicapai pada iterasi ke 20.

Gambar 4.9 adalah perbandingan respon *input step* antara kontroler ZN-PID dan kontroler PSO-PID.



Gambar 4.9 Perbandingan Respon sistem antara ZN-PID dan PSO-PID

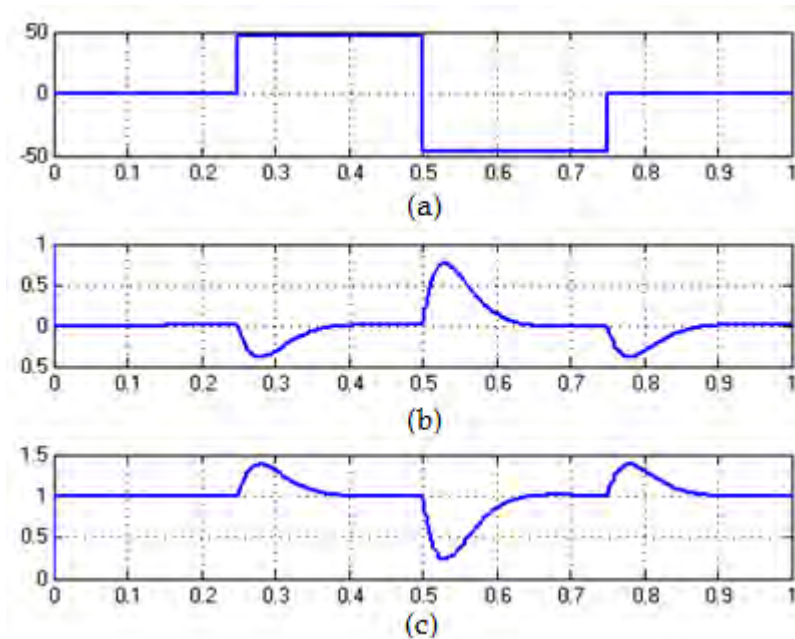
Dari Gambar 4.9 terlihat kontroler PSO-PID memiliki performansi yang lebih baik dari kontroler ZN-PID. Untuk lebih jelasnya kinerja kedua kontroler tersebut dapat dilihat dalam Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Perbandingan performansi Motor DC

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	t_r (det)	t_p (det)	mo	t_s (det)
Close-loop	-	-	-	0,0644	0,089	0,071607	0,1303
ZN-PID	24360	$7,1967 \times 10^7$	$8,4621 \times 10^{-5}$	0,00017	0,00037	0,69708	0,00633
PSO-PID	83,036	1834,3	1,389	0,00242	0,02959	0,005164	0,00131
	Iterasi =20			ITAE=0.001891			

Berdasarkan Tabel 4.1 diatas, parameter PID diperoleh pada iterasi ke-20 dengan *integral of time weight square error* ITAE 0,001891. Parameter PID hasil penalaan dengan PSO ini menghasilkan $K_p=83,036$, $K_i=1834,3$, dan $K_d=1,389$. Maksimum overshoot dan *time settling* PSO-PID lebih rendah dari ZN-PID.

Gambar 4.10 berikut menunjukkan respon motor DC dengan gangguan bervariasi menggunakan kontrol PSO-PID



Gambar 4.10 Respon sistem kontroler PSO-PID input step dengan gangguan;

(a) sinyal gangguan, (b) sinyal error, (c) sinyal output

4.4 Uji Respon Penjejak Matahari Tanpa Beban

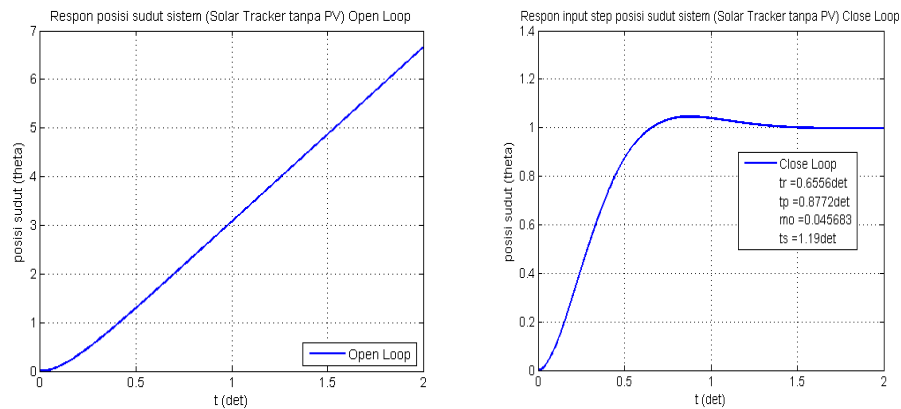
Seperti langkah uji respon motor DC pada subbab 4.3, untuk uji respon penjejak matahari tanpa beban, diperoleh performansi sistem yang ditunjukkan dalam Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Perbandingan performansi Solar Tracker tanpa beban PV

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	0.6556	0.8772	0.0456831	1.19
ZN-PID	243596.3	248081144	59.798131	0.0005	0.0011	0.6967554	0.0184
PSO-PID	124.13474	387.3741	11.276927	0.01535	0.02495	0.0126227	0.0121
	Iterasi =2			ITAE=0.074142			

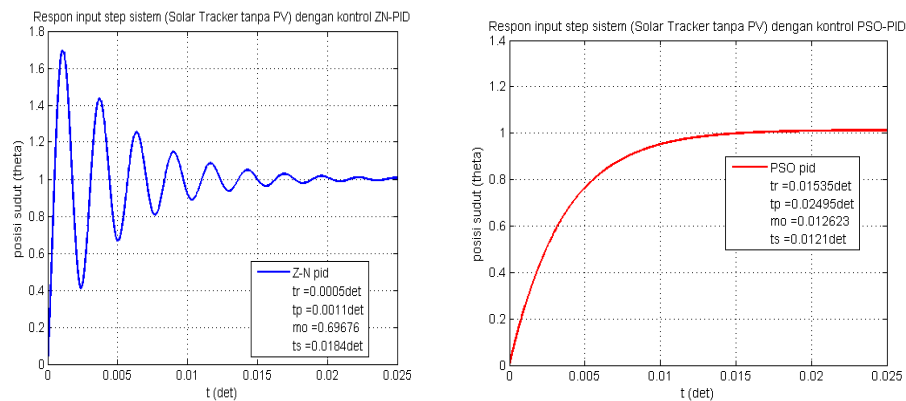
Gambar 4.11 dan 4.12 berikut adalah plot Gambar untuk masing-masing uji respon.

- Respon uji penjejak matahari tanpa beban tanpa sistem kontrol



Gambar 4.11 Respon pengujian *open loop* dan *close loop* penjejak matahari tanpa beban

- Respon Uji penjejak matahari tanpa beban dengan sistem kontrol



Gambar 4.12 Respon pengujian dengan kontroler ZN-PID dan PSO-PID penjejak matahari tanpa beban

4.5 Uji Respon Sistem Fotovoltaik Penjejak Matahari dua Sumbu dengan Beban Panel Sel Surya STM40-50

Sistem fotovoltaik penjejak matahari dua Sumbu terdiri dari sumbu putar horisontal (menjejak sudut elevasi matahari) dan sumbu putar vertikal (menjejak sudut azimuth matahari). Untuk masing-masing sumbu diuji responnya sebagaimana diuraikan pada subbab berikut.

4.5.1 Uji Respon Sumbu Putar Horisontal

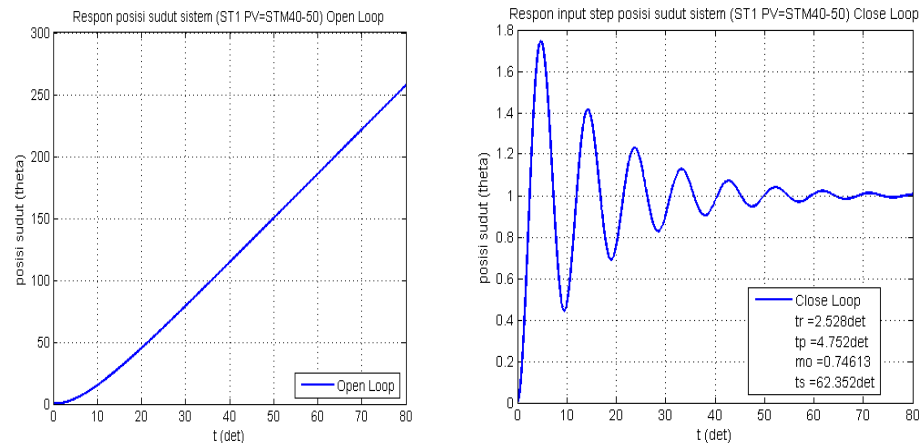
Hasil uji respon performansi sistem fotovoltaik penjejak matahari sumbu putar horisontal ditunjukkan dalam Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Perbandingan performansi sumbu putar horisontal PV=STM40-50

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	2.528	4.752	0.7461287	62.352
ZN-PID	243596.27	32856990	451.49559	0.004	0.008	0.6975726	0.1392
PSO-PID	212.38107	27.081021	151.65389	0.0612	0.122	0.0169248	0.0496
	Iterasi=3			ITAE=1.3315			

Berikut adalah plot Gambar untuk masing-masing uji respon

- Respon Uji sistem fotovoltaik penjejak matahari sumbu putar horisontal dengan beban panel sel surya STM40-50 tanpa sistem kontrol

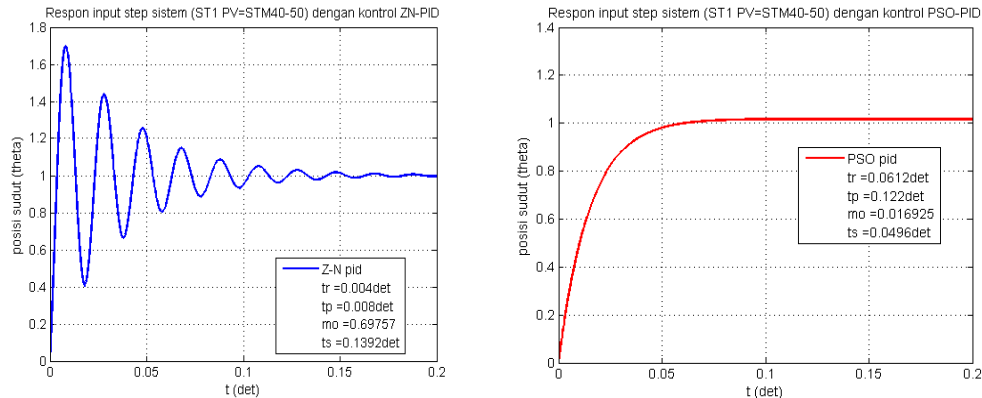


Gambar 4.13 Respon pengujian *open loop* dan *close loop*

Sistem penjejak matahari sumbu putar horisontal dengan beban STM40-50

Berdasarkan Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa pada uji *open loop*, posisi sudut sistem penjejak matahari sumbu putar horisontal dengan beban STM40-50 bertambah seiring pertambahan waktu. Sementara pada uji *close loop*, posisi sudut mulai stabil pada detik ke 62,352.

- Respon Uji sistem fotovoltaik penjejak matahari sumbu putar horisontal dengan beban panel sel surya STM40-50 dengan sistem kontrol



Gambar 4.14 Respon pengujian dengan kontroler ZN-PID dan PSO-PID sistem penjejak matahari sumbu putar horisontal dengan beban STM40-50

4.5.2 Uji Respon Sumbu Putar Vertikal

Hasil uji respon performansi sistem fotovoltaik penjejak matahari sumbu putar vertikal ditunjukkan dalam Tabel 4.4 berikut.

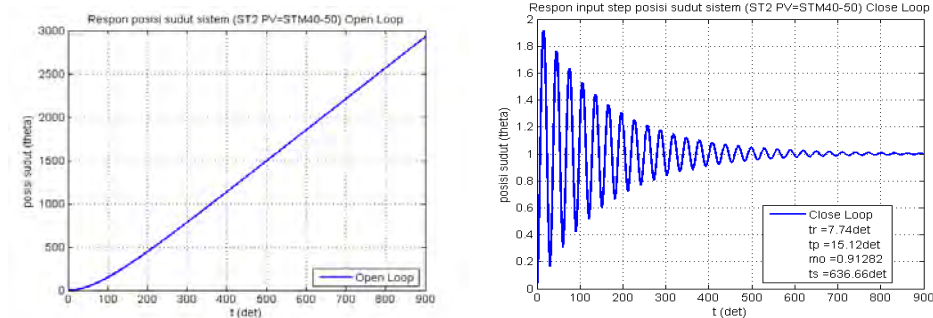
Tabel 4.4 Perbandingan performansi sumbu putar vertikal PV=STM40-50

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	7.74	15.12	0.9128216	636.66
ZN-PID	243596.27	10274193	1443.8883	0.0128	0.0256	0.6976601	0.4448
PSO-PID	487.21112	21.401198	732.02534	0.128	0.2544	0.0183095	0.104
	Iterasi=8			ITAE=8.6801			

Berdasarkan Tabel 4.4 diatas, parameter PID diperoleh pada iterasi ke-8 dengan *integral of time weight square error* ITAE 8.6801. Parameter PID hasil penalaan dengan PSO ini menghasilkan $K_p=487,21112$, $K_i=21,401198$, dan $K_d=732,02534$. Maksimum overshoot dan *time settling* PSO-PID lebih rendah dari ZN-PID.

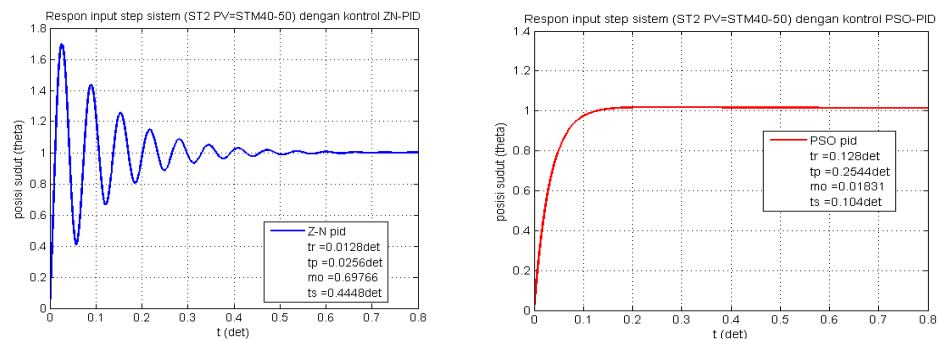
Gambar 4.15 dan 4.16 berikut adalah plot Gambar untuk masing-masing uji respon sistem fotovoltaik penjejak matahari sumbu putar vertikal.

- Respon Uji sistem fotovoltaik penjejak matahari sumbu putar vertikal dengan beban panel sel surya STM40-50 tanpa sistem kontrol



Gambar 4.15 Respon pengujian *open loop* dan *close loop* sistem penjejak matahari sumbu putar vertikal dengan beban STM40-50

- Respon Uji sistem fotovoltaik penjejak matahari sumbu putar vertikal dengan beban panel sel surya STM40-50 dengan sistem kontrol



Gambar 4.16 Respon pengujian dengan kontroler ZN-PID dan PSO-PID sistem penjejak matahari sumbu putar vertikal dengan beban STM40-50

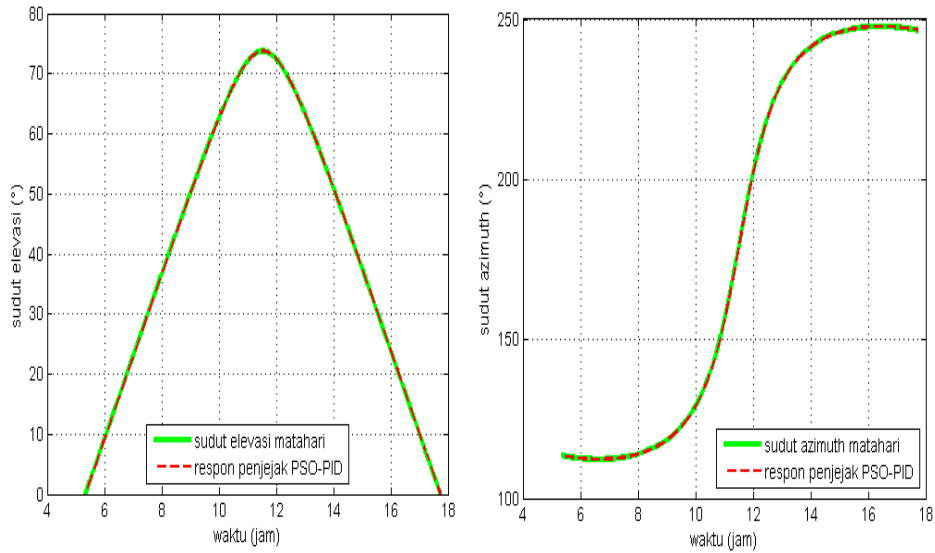
Hasil uji respon atau performansi sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu dengan beban berbagai beban panel sel surya bisa dilihat dalam Lampiran A Tabel performansi sistem.

4.6 Hasil Uji Simulasi Sistem Kontrol PSO-PID Pada Sistem Fotovoltaik Penjejak Matahari dua Sumbu dengan Beban Panel Sel Surya STM40-50

Yang dimaksud uji simulasi sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu yang dilakukan adalah penerapan hasil perancangan sistem kontrol PSO-PID secara simulasi dengan masukan pergerakan matahari setiap saat. Dalam simulasi ini, pergerakan matahari sebagai inputan

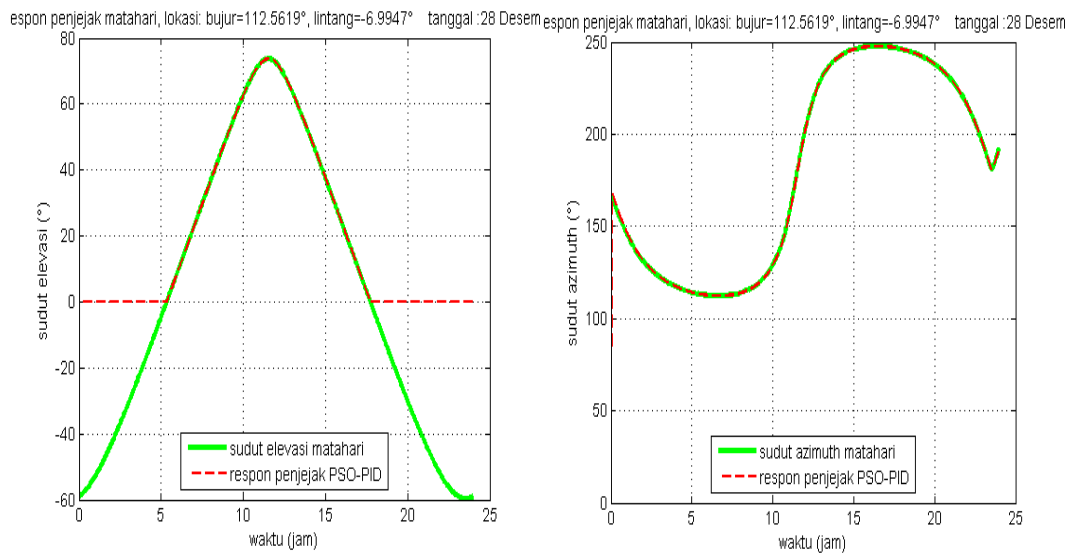
adalah pergerakan matahari sebagaimana yang telah dijelaskan dalam bab 3.9. Hasil simulasi ini ditunjukkan dalam Gambar 4.17 s/d 4.19 berikut.

➤ Hasil simulasi pada siang hari



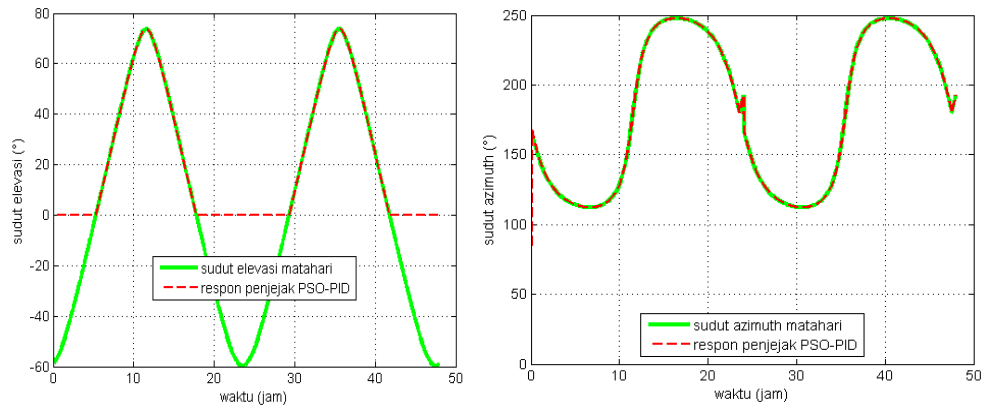
Gambar 4.17 Hasil simulasi sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu saat matahari terlihat

➤ Hasil simulasi untuk satu hari penuh



Gambar 4.18 Hasil simulasi sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu dalam 24 jam

➤ Hasil simulasi untuk dua hari



Gambar 4.19 Hasil simulasi sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu selama dua hari

Dari Gambar-Gambar di atas terlihat bahwa sistem kontrol PSO-PID pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu yang dirancang dapat mengikuti posisi sudut matahari. Dari Gambar juga terlihat untuk sumbu putar horisontal hanya mengikuti posisi sudut elevasi saat matahari diatas horizon bumi, hal ini harus dilakukan untuk menghindari panel sel surya dalam perputaran sumbu horisontal mengenai penyanggah penjejak matahari. Sementara untuk sumbu putar vertikal penjejak matahari mengikuti posisi sudut azimuth matahari setiap saat, hal ini dimaksudkan agar penjejak matahari bisa kembali mengarah matahari saat matahari mulai terbit.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini, PID auto tuning menggunakan PSO pada sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu untuk beban fotovoltaik model STM40-50 dapat disimpulkan bahwa parameter PID hasil penalaan dengan algoritma PSO untuk sumbu putar horisontal adalah $K_p=212.38107$, $K_i=27.081021$, dan $K_d=151.65389$ yang diperoleh dalam 3 iterasi dengan minimal fungsi fitness akhir 1.3315. Sedangkan parameter PID hasil penalaan dengan algoritma PSO untuk sumbu putar vertikal adalah $K_p=487.21112$, $K_i=21.401198$, dan $K_d=732.02534$ yang diperoleh dalam 8 iterasi dengan minimal fungsi fitness akhir 8.6801.

Performansi sistem kestabilan kontrol PSO-PID baik untuk sumbu putar horisontal maupun sumbu vertikal penjejak matahari lebih baik daripada sistem kontrol ZN-PID. Hasil performansi sistem kestabilan kontrol ZN-PID untuk sumbu putar horisontal yaitu maksimum overshoot 69,76%, dan *settling time* 0,1392 detik. Hasil performansi sistem kestabilan kontrol PSO-PID untuk sumbu putar horisontal yaitu maksimum overshoot 1,69%, dan *settling time* 0,0496 detik. Hasil performansi sistem kestabilan kontrol ZN-PID untuk sumbu putar vertikal yaitu maksimum overshoot 69,77%, dan *settling time* 0,4448 detik. Hasil performansi sistem kestabilan kontrol PSO-PID untuk sumbu putar vertikal yaitu maksimum overshoot 1,83%, dan *settling time* 0,104 detik.

Dengan kenyataan perubahan sudut elevasi matahari yang lambat (rata-rata 4° tiap menit) dan *settling time* kendali PSO-PID 0,0496 detik, sistem kontrol yang dirancang mampu melakukan *tracking* posisi matahari dengan *smooth*.

5.2 Saran

Penelitian ini dapat dikembangkan dengan menambahkan faktor kecepatan angin yang mengenai penampang sel surya sehingga mempengaruhi beban momen inersia secara dinamis.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran A

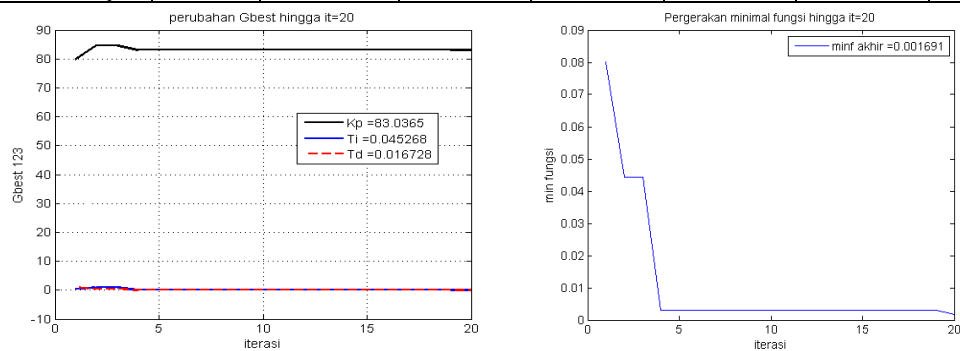
Perbandingan Performansi dan Proses Penalaan PSO

Berikut adalah data perbandingan performansi antara *close-loop*, ZN-PID, dan kontrol PSO-PID untuk berbagai sistem atau plant.

A.1 Motor DC

Tabel A.1 Perbandingan performansi sistem (DCM)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
ZN-PID	24360	$7,1967 \times 10^{-7}$	$8,4621 \times 10^{-5}$	0,00017	0,00037	0,69708	0,00633
PSO-PID	83,036	1834,3	1,389	0,00242	0,02959	0,005164	0,00131
Close-loop	-	-	-	0,0644	0,089	0,071607	0,1303

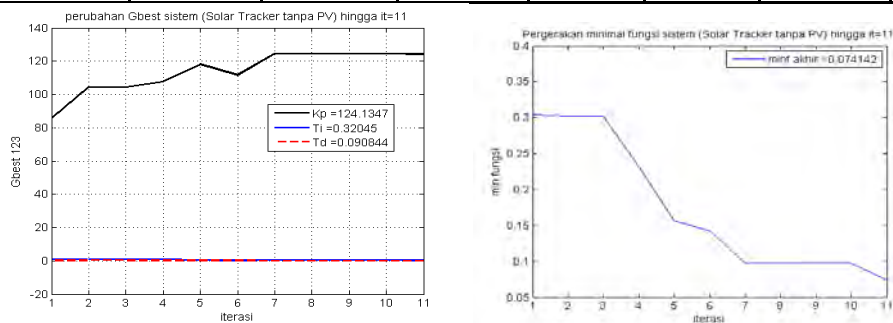


Gambar A.1 iterasi dan perubahan minimal fungsi fitness DCM

A.2 Penjejak Matahari Tanpa Beban

Tabel A.2 Perbandingan performansi sistem (Solar Tracker tanpa PV)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	0.6556	0.8772	0.0456831	1.19
ZN-PID	243596.3	248081144	59.798131	0.0005	0.0011	0.6967554	0.0184
PSO-PID	124.13474	387.3741	11.276927	0.01535	0.02495	0.0126227	0.0121



Gambar A.2 iterasi dan perubahan minimal fungsi fitness tracker tanpa beban

A.3 Sistem Fotovoltaik Penjejak Matahari dengan Beban PV

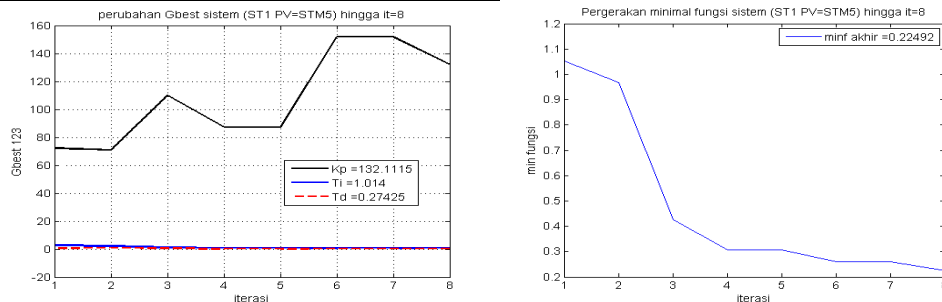
Sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu terdiri dari sumbu putar horisontal dan sumbu putar vertikal. Sementara beban panel sel surya (PV) yang digunakan sebanyak 5 model, sehingga ada 10 tabel.

A.3.1 PV STM5

➤ Sumbu putar horisontal

Tabel A.3.1.1 Perbandingan performansi sistem (ST1 PV=STM5)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	0.848	1.392	0.3284773	4.6368
ZN-PID	243596.28	118246554	125.4564	0.00108	0.00228	0.6978696	0.03864
PSO-PID	132.11146	130.29076	36.232208	0.02268	0.0456	0.0092168	0.01704

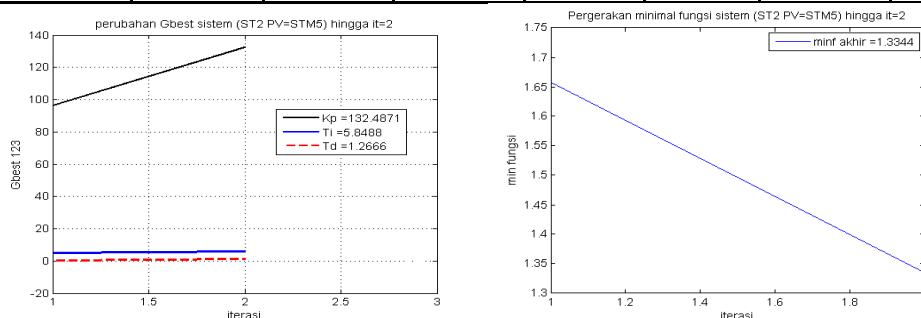


Gambar A.3.1.1 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST1 PV=STM5

➤ Sumbu putar vertikal

Tabel A.3.1.2 Perbandingan performansi sistem (ST2 PV=STM5)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	1.93	3.56	0.6751684	33
ZN-PID	243596.27	43920188	337.76691	0.0028	0.006	0.6977385	0.104
PSO-PID	132.48712	22.652151	167.80335	0.0416	0.0832	0.0041325	0.028



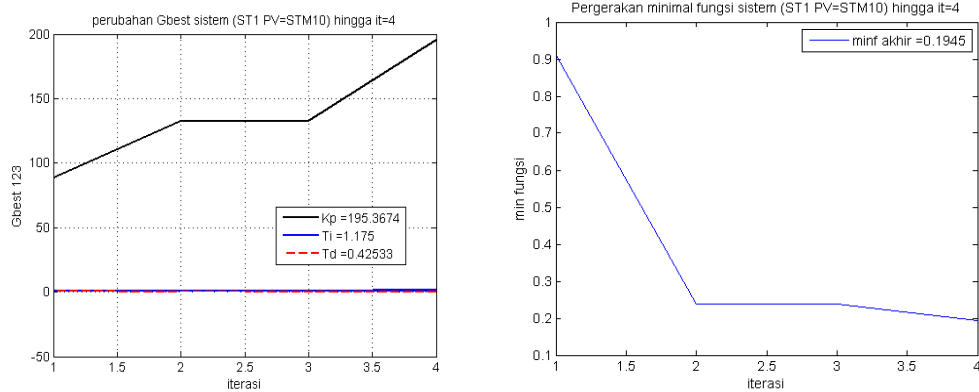
Gambar A.3.1.2 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST2 PV=STM5

A.3.2 PV STM10

➤ Sumbu putar horisontal

Tabel A.3.2.1 Perbandingan performansi sistem (ST1 PV=STM10)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	0.8622	1.422	0.3380469	4.7628
ZN-PID	243596.28	115525033	128.41188	0.0012	0.0024	0.6945119	0.0394
PSO-PID	195.36741	166.26613	83.095129	0.0142	0.041	0.0018216	0.0084

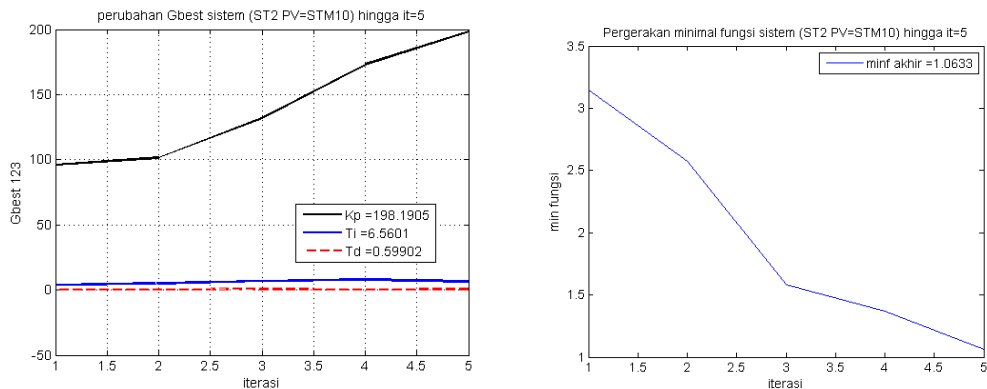


Gambar A.3.2.1 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST1 PV=STM10

➤ Sumbu putar vertikal

Tabel A.3.2.2 Perbandingan performansi sistem (ST2 PV=STM10)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	2.24	4.192	0.7171451	47.008
ZN-PID	243596.27	37257183	398.17251	0.0035	0.007	0.6967944	0.1225
PSO-PID	198.19047	30.211302	118.72053	0.0585	0.1165	0.0195902	0.048



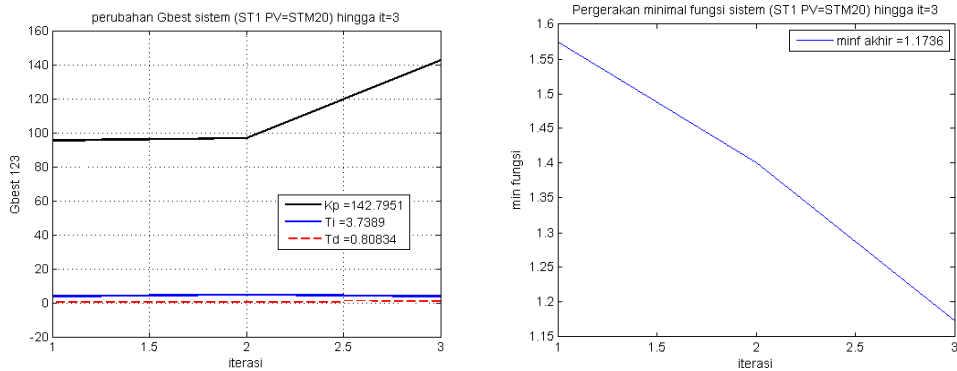
Gambar A.3.2.2 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST2 PV=STM10

A.3.3 PV STM20

➤ Sumbu putar horisontal

Tabel A.3.3.1 Perbandingan performansi sistem (ST1 PV=STM20)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	1.824	3.36	0.6588642	30.824
ZN-PID	243596.27	46607552	318.29147	0.0028	0.0056	0.6968665	0.098
PSO-PID	142.79513	38.191962	115.42762	0.046	0.0928	0.0090117	0.0344

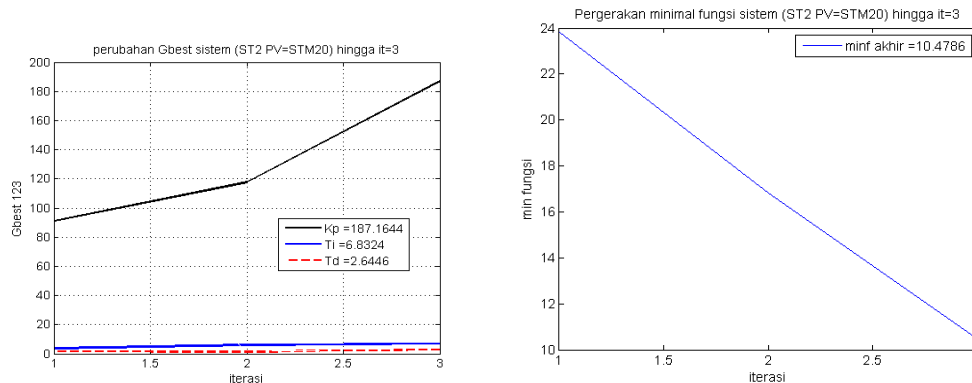


Gambar A.3.3.1 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST1 PV=STM20

➤ Sumbu putar vertikal

Tabel A.3.3.2 Perbandingan performansi sistem (ST2 PV=STM20)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	5.04	9.68	0.8665353	261.2
ZN-PID	243596.27	16116543	920.46946	0.008	0.0168	0.6977679	0.2832
PSO-PID	187.16445	27.393541	494.98256	0.0968	0.2008	0.0063951	0.0688



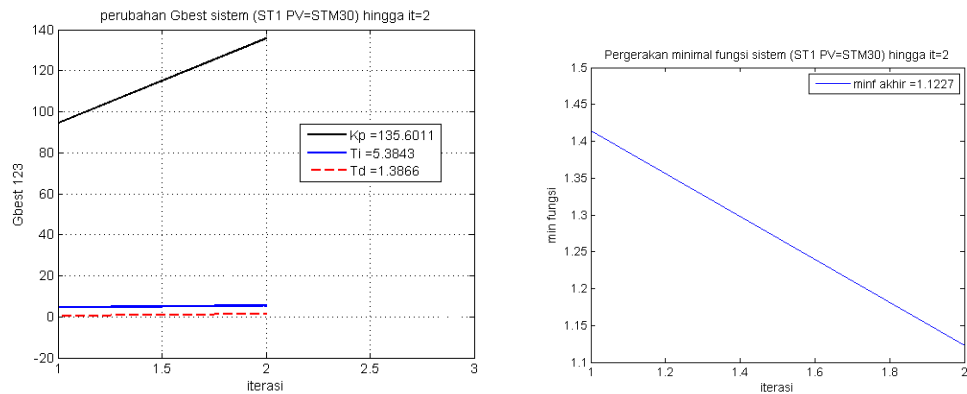
Gambar A.3.3.2 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST2 PV=STM20

A.3.4 PV STM30

➤ Sumbu putar horisontal

Tabel A.3.4.1 Perbandingan performansi sistem (ST1 PV=STM30)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	1.65	3.018	0.6270417	24.696
ZN-PID	243596.27	52024045	285.15249	0.0024	0.00504	0.6973261	0.08784
PSO-PID	135.6011	25.184676	188.02295	0.03024	0.06	0.0019358	0.01824

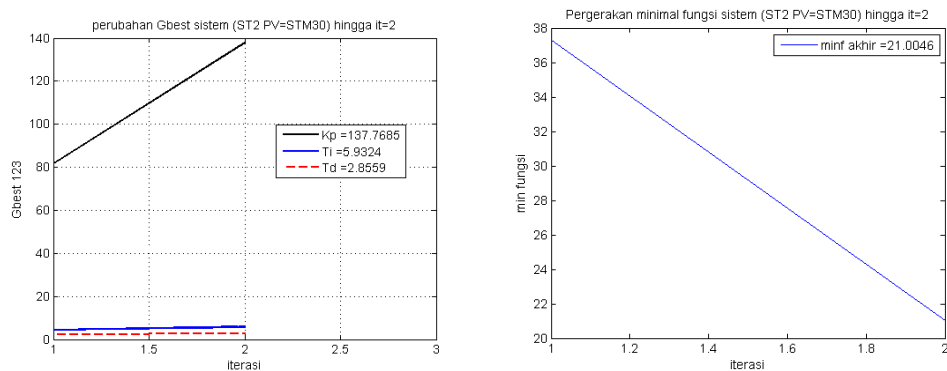


Gambar A.3.4.1 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST1 PV=STM30

➤ Sumbu putar vertikal

Tabel A.3.4.2 Perbandingan performansi sistem (ST2 PV=STM30)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	5.8	11.2	0.8845039	350.3
ZN-PID	243596.27	13808747	1074.3035	0.009	0.019	0.69745	0.331
PSO-PID	137.76851	23.223232	393.45336	0.151	0.32	0.0102661	0.114



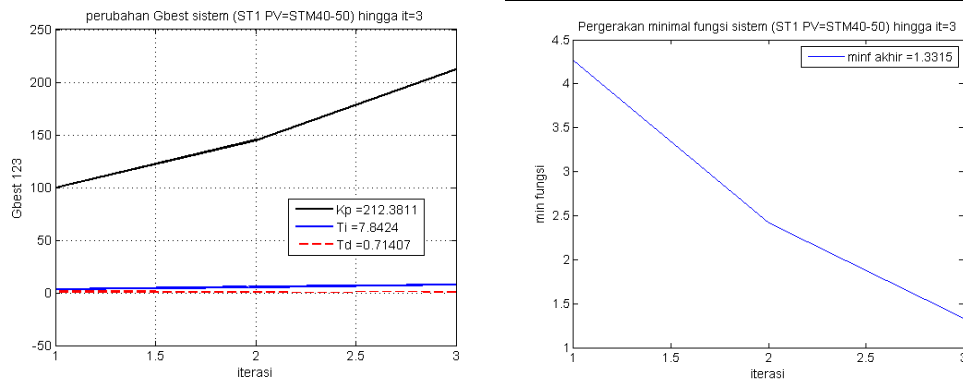
Gambar A.3.4.2 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST2 PV=STM30

A.3.5 PV STM40-50

➤ Sumbu putar horisontal

Tabel A.3.5.1 Perbandingan performansi sistem (ST1 PV=STM40-50)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	2.528	4.752	0.7461287	62.352
ZN-PID	243596.27	32856990	451.49559	0.004	0.008	0.6975726	0.1392
PSO-PID	212.38107	27.081021	151.65389	0.0612	0.122	0.0169248	0.0496

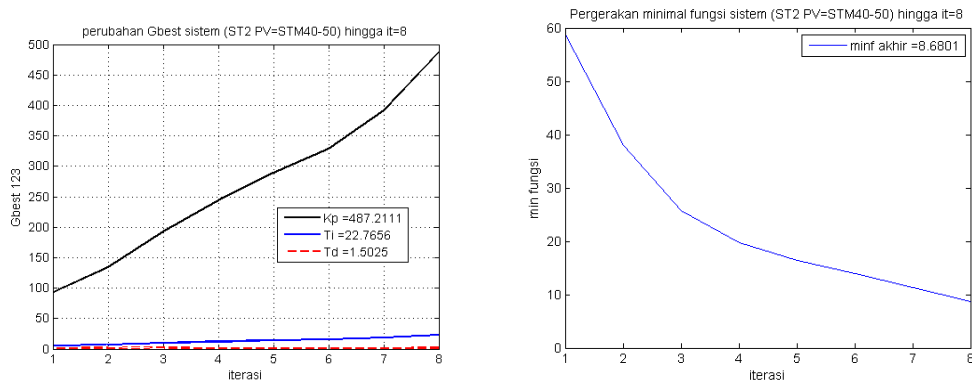


Gambar A.3.5.1 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST1 PV=STM40-50

➤ Sumbu putar vertikal

Tabel A.3.5.2 Perbandingan performansi sistem (ST2 PV=STM40-50)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	7.74	15.12	0.9128216	636.66
ZN-PID	243596.27	10274193	1443.8883	0.0128	0.0256	0.6976601	0.4448
PSO-PID	487.21112	21.401198	732.02534	0.128	0.2544	0.0183095	0.104



Gambar A.3.5.2 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST2 PV=STM40-50

Lampiran B

Perhitungan Posisi Matahari

Posisi matahari terhadap suatu lokasi dipermukaan bumi dapat direpresentasikan dalam posisi sudut elevasi atau sudut *altitude* dan sudut *azimuth*. Berikut adalah contoh langkah perhitungan untuk menentukan posisi matahari dan informasi lain terkait matahari dengan data-data sebagai berikut

- lokasi kota Sidayu kabupaten Gresik
 - lintang selatan : $-6.99465^\circ = -6^\circ 59' 41''$
 - bujur timur : $112.562^\circ = 112^\circ 33' 43''$
- waktu : 10:00:00 WIB
- tanggal : 28 Desember 2015 $\rightarrow d=362$ hari
- beda waktu GMT : 7 jam

berdasarkan persamaan (2.1) samapai dengan persamaan (2.13) langkah perhitungan sebagai berikut;

➤ LSTM (*Local Standard Time Meridian*)

$$LSTM = 15^0 \cdot (LT - GMT) = 15^0 \cdot (7) = 105^0$$

➤ B (*day angle*)

$$B = \frac{360}{365}(d - 81) = \frac{360}{365}(362 - 81) = 277,151^0$$

➤ EoT (*equation of time*)

$$\begin{aligned} EoT &= 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \\ &= 9,87 \sin(2 \cdot (277,151^0)) - 7,53 \cos(277,151^0) - 1,5 \sin(277,151^0) \\ &= -1,8871 \text{ menit} = -1' 53'' \end{aligned}$$

➤ TC (*Time Correction*)

$$\begin{aligned} TC &= 4(Longitude - LSTM) + EoT \\ &= 4(112,562 - 105) + (-1,8871) = 28,3607 \text{ menit} = 28' 21'' \end{aligned}$$

➤ LST (*Local Solar Time*)

$$LST = LT + \frac{TC}{60} = 10 + \frac{28,3607}{60} = 10,4727 \text{ jam} = 10 \text{ } 28' 22''$$

- Sudut jam HRA (*Hour Angle*)

$$HRA = 15^0(10,4727 - 12) = -22,9098^\circ = -22^\circ 54' 35''$$

- Sudut Deklinasi (δ)

$$\delta = 23,45^0 \cdot \sin(B)$$

$$= 23,45^0 \cdot \sin(277,151^0) = -23,2676^\circ = -23^\circ 16' 3''$$

- Sudut Elevasi (α)

$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \sin \varphi - \cos \delta \cos \varphi \cos(HRA))$$

$$= \arcsin[\sin(-23,2676^\circ) \sin(-6,99465^\circ) \dots$$

$$- \cos(-23,2676^\circ) \cos(-6,99465^\circ) \cos(-22,9098^\circ)]$$

$$= \arcsin[0,048105 + 0,839906] = 62,6244^\circ = 62^\circ 37' 28''$$

- Sudut Zenith (ζ)

$$\zeta = 90^0 - 62,6244^\circ = 27,3756^\circ = 27^\circ 22' 32''$$

- Sudut Azimuth (γ)

karena $LST < 12$ atau $HRA < 0$, maka

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos(HRA)}{\cos \alpha}\right)$$

$$= \arccos\left(\frac{\sin(-23,2676^\circ) \cos(-6,99465^\circ) - \cos(-23,2676^\circ) \sin(-6,99465^\circ) \cos(-22,9098^\circ)}{\cos(62,6244^\circ)}\right)$$

$$= \arccos\left(\frac{-0,392086 - (-0,103048)}{0,459822}\right) = 128,946^\circ = 128^\circ 56' 45''$$

- Waktu matahari terbit (*sunrise*)

$$sunrise = 12 - \frac{1}{15^0} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) - \frac{TC}{60}$$

$$= 12 - \frac{1}{15^0} \arccos(-\tan(-6,99465^\circ) \tan(-23,2676^\circ)) - \frac{28,3607}{60}$$

$$= 12 - 6,20161 - 0,472678 = 5,32571 = 5^\circ 19' 33''$$

- Waktu matahari terbenam (*sunset*)

$$sunset = 12 + \frac{1}{15^0} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) - \frac{TC}{60}$$

$$= 12 + \frac{1}{15^0} \arccos(-\tan(-6,99465^\circ) \tan(-23,2676^\circ)) - \frac{28,3607}{60}$$

$$= 12 + 6,20161 - 0,472678 = 17,7289 = 17^\circ 43' 44''$$

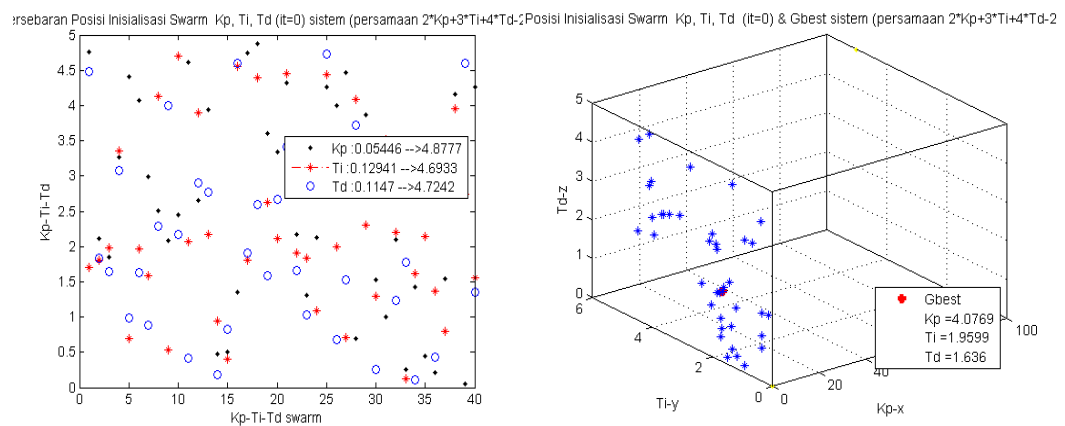
Lampiran C

Validasi PSO

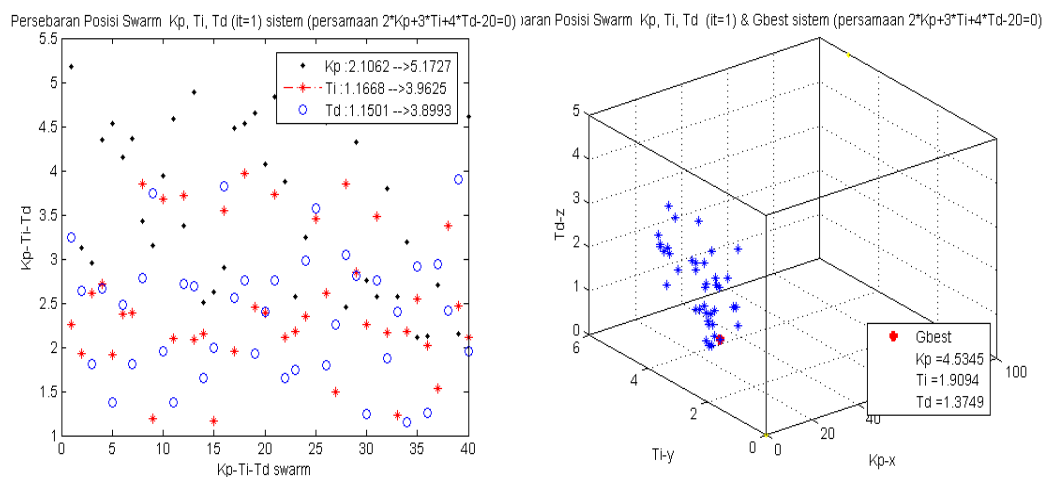
Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan salah satu teknik optimasi suatu model atau persamaan. Pada penelitian ini PSO digunakan untuk mencari nilai parameter PID (K_p , K_i , K_d). Pada lampiran ini dilakukan validasi algoritma PSO yang digunakan. Validasi yang dilakukan adalah dengan mencari nilai suatu persamaan yang mengandung 3 variabel. Persamaan yang digunakan,

$$2K_p + 3T_i + 4T_d = 20 \quad (C.1)$$

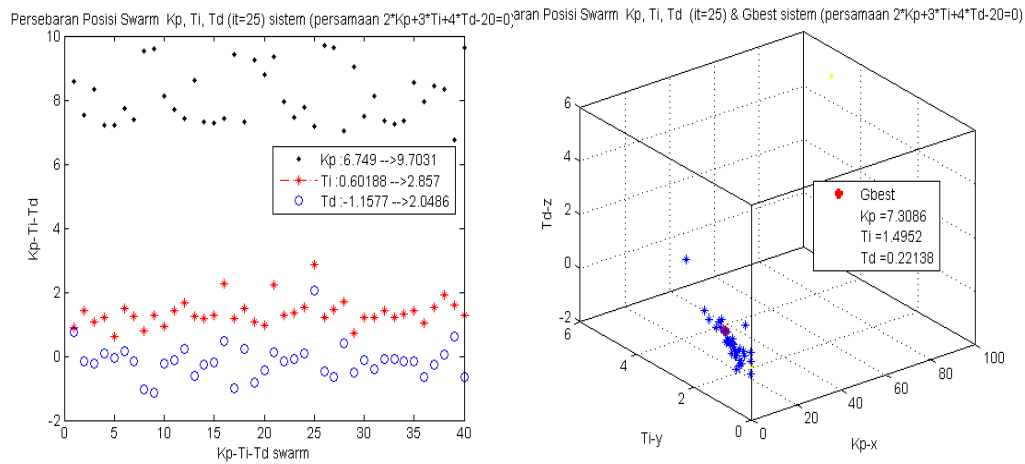
Berikut adalah Gambar-Gambar proses pencarian nilai persamaan yang dimaksud.



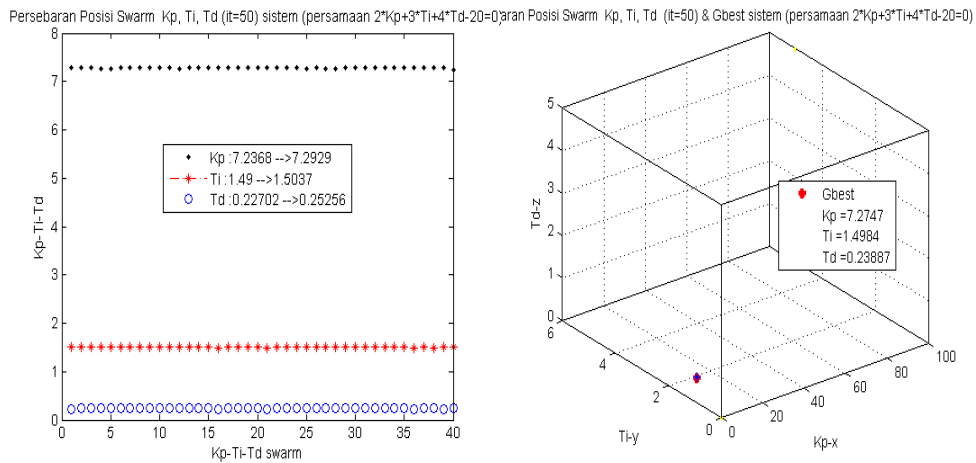
Gambar C1. Persebaran 40 partikel swarm dan nilai Gbest inisialisasi



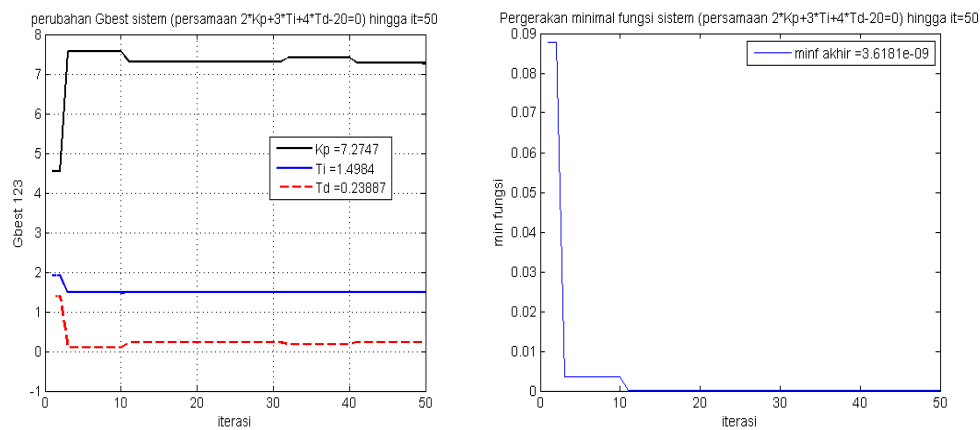
Gambar C2. Persebaran swarm dan nilai Gbest pada iterasi ke 1



Gambar C3. Persebaran swarm dan nilai Gbest pada iterasi ke 25



Gambar C4. Persebaran swarm dan nilai Gbest pada iterasi ke 50 (akhir)



Gambar C5 Pergerakan nilai Gbest dan minimal fitness function sampai akhir iterasi

Dari Gambar C5 diperoleh nilai $K_p = 7,2747$, $T_i = 1,4984$, dan $T_d = 0,2389$ pada iterasi ke-50 dengan minimal fitness function $3,6181 \times 10^{-9}$. Bila nilai K_p , T_i , dan T_d disubstitusikan ke dalam ruas kiri persamaan C.1, diperoleh

$$\begin{aligned} 2K_p + 3T_i + 4T_d &= 2(7,2747) + 3(1,4984) + 4(0,2389) \\ &= 14.5494 + 4.4952 + 0.95548 \\ &= 20,00008 \end{aligned}$$

Hasil yang diperoleh mendekati nilai yang sebenarnya.

Tabel C.1 berikut adalah nilai variabel K_p , T_i , dan T_d persamaan C.1 yang lain dengan menggunakan algoritma PSO.

Tabel C.1 Hasil optimasi persamaan $2K_p + 3T_i + 4T_d = 20$ menggunakan PSO

No	Iterasi	Hasil			Hasil substitusi
		K_p	T_i	T_d	
1	17	3.7276	3.5189	0.497	19.9999
2	26	1.7437	1.418	3.0647	20.0002
3	36	2.2591	2.5176	1.9822	19.9998
4	41	1.4491	3.6699	1.523	19.9999
5	42	1.6331	3.6524	1.4442	20.0002
6	50	7.2747	1.4984	0.23887	20.00008

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran A

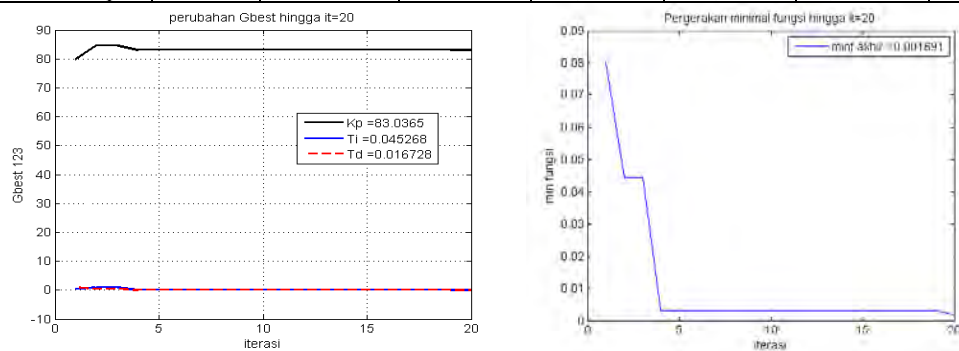
Perbandingan Performansi dan Proses Penalaan PSO

Berikut adalah data perbandingan performansi antara *close-loop*, ZN-PID, dan kontrol PSO-PID untuk berbagai sistem atau plant.

A.1 Motor DC

Tabel A.1 Perbandingan performansi sistem (DCM)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
ZN-PID	24360	$7,1967 \times 10^{-7}$	$8,4621 \times 10^{-5}$	0,00017	0,00037	0,69708	0,00633
PSO-PID	83,036	1834,3	1,389	0,00242	0,02959	0,005164	0,00131
Close-loop	-	-	-	0,0644	0,089	0,071607	0,1303

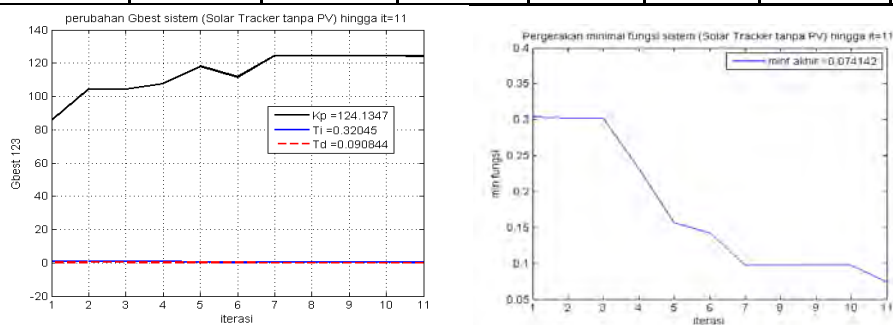


Gambar A.1 iterasi dan perubahan minimal fungsi fitness DCM

A.2 Penjejak Matahari Tanpa Beban

Tabel A.2 Perbandingan performansi sistem (Solar Tracker tanpa PV)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	0.6556	0.8772	0.0456831	1.19
ZN-PID	243596.3	248081144	59.798131	0.0005	0.0011	0.6967554	0.0184
PSO-PID	124.13474	387.3741	11.276927	0.01535	0.02495	0.0126227	0.0121



Gambar A.2 iterasi dan perubahan minimal fungsi fitness tracker tanpa beban

A.3 Sistem Fotovoltaik Penjejak Matahari dengan Beban PV

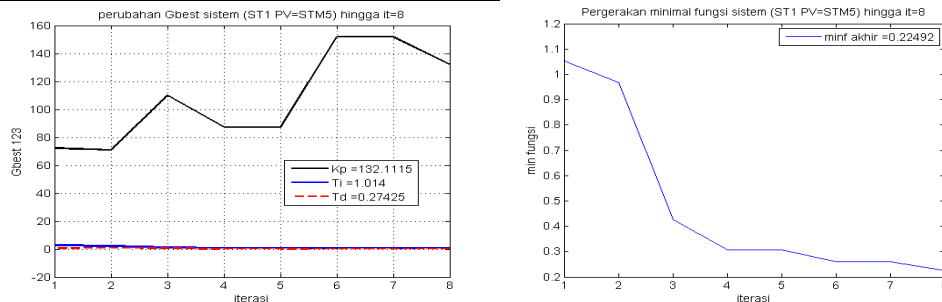
Sistem fotovoltaik penjejak matahari dua sumbu terdiri dari sumbu putar horisontal dan sumbu putar vertikal. Sementara beban panel sel surya (PV) yang digunakan sebanyak 5 model, sehingga ada 10 tabel.

A.3.1 PV STM5

➤ Sumbu putar horisontal

Tabel A.3.1.1 Perbandingan performansi sistem (ST1 PV=STM5)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	0.848	1.392	0.3284773	4.6368
ZN-PID	243596.28	118246554	125.4564	0.00108	0.00228	0.6978696	0.03864
PSO-PID	132.11146	130.29076	36.232208	0.02268	0.0456	0.0092168	0.01704

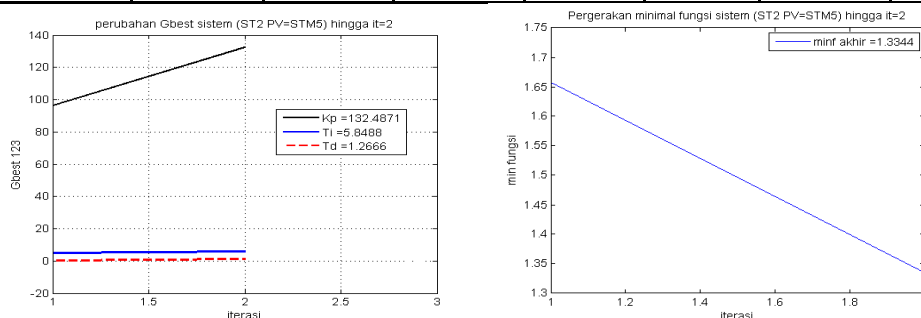


Gambar A.3.1.1 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST1 PV=STM5

➤ Sumbu putar vertikal

Tabel A.3.1.2 Perbandingan performansi sistem (ST2 PV=STM5)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	1.93	3.56	0.6751684	33
ZN-PID	243596.27	43920188	337.76691	0.0028	0.006	0.6977385	0.104
PSO-PID	132.48712	22.652151	167.80335	0.0416	0.0832	0.0041325	0.028



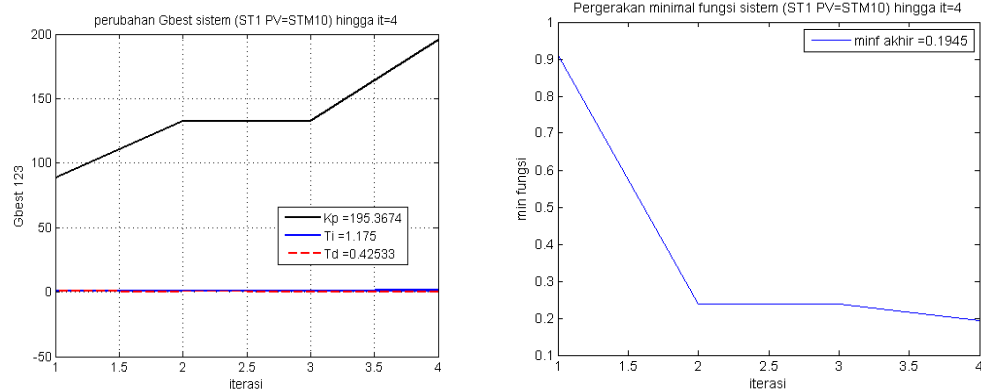
Gambar A.3.1.2 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST2 PV=STM5

A.3.2 PV STM10

➤ Sumbu putar horisontal

Tabel A.3.2.1 Perbandingan performansi sistem (ST1 PV=STM10)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	0.8622	1.422	0.3380469	4.7628
ZN-PID	243596.28	115525033	128.41188	0.0012	0.0024	0.6945119	0.0394
PSO-PID	195.36741	166.26613	83.095129	0.0142	0.041	0.0018216	0.0084

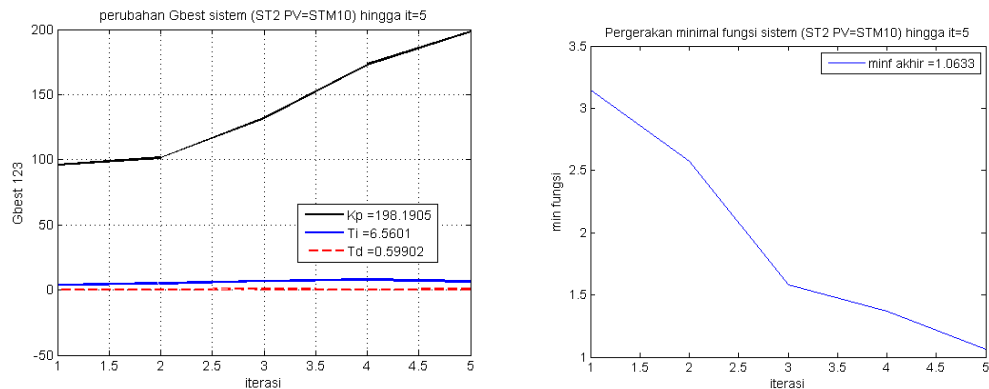


Gambar A.3.2.1 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST1 PV=STM10

➤ Sumbu putar vertikal

Tabel A.3.2.2 Perbandingan performansi sistem (ST2 PV=STM10)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	2.24	4.192	0.7171451	47.008
ZN-PID	243596.27	37257183	398.17251	0.0035	0.007	0.6967944	0.1225
PSO-PID	198.19047	30.211302	118.72053	0.0585	0.1165	0.0195902	0.048



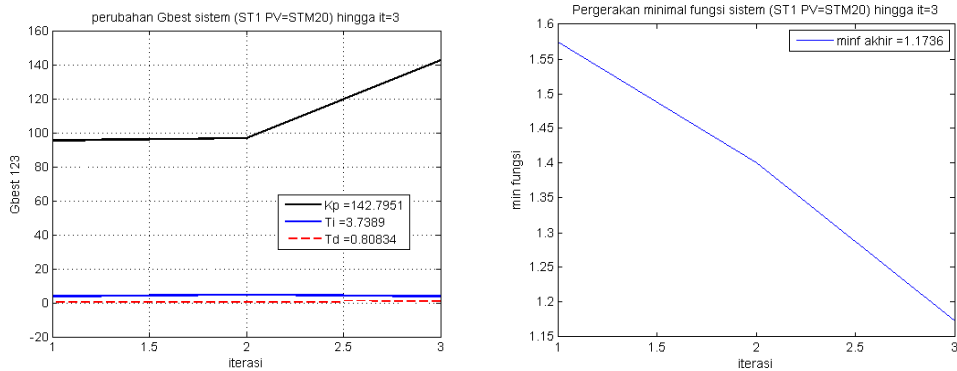
Gambar A.3.2.2 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST2 PV=STM10

A.3.3 PV STM20

➤ Sumbu putar horisontal

Tabel A.3.3.1 Perbandingan performansi sistem (ST1 PV=STM20)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	1.824	3.36	0.6588642	30.824
ZN-PID	243596.27	46607552	318.29147	0.0028	0.0056	0.6968665	0.098
PSO-PID	142.79513	38.191962	115.42762	0.046	0.0928	0.0090117	0.0344

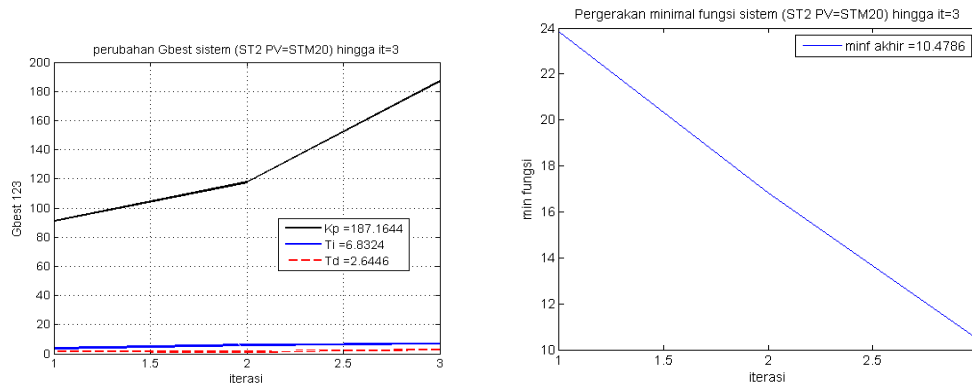


Gambar A.3.3.1 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST1 PV=STM20

➤ Sumbu putar vertikal

Tabel A.3.3.2 Perbandingan performansi sistem (ST2 PV=STM20)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	5.04	9.68	0.8665353	261.2
ZN-PID	243596.27	16116543	920.46946	0.008	0.0168	0.6977679	0.2832
PSO-PID	187.16445	27.393541	494.98256	0.0968	0.2008	0.0063951	0.0688



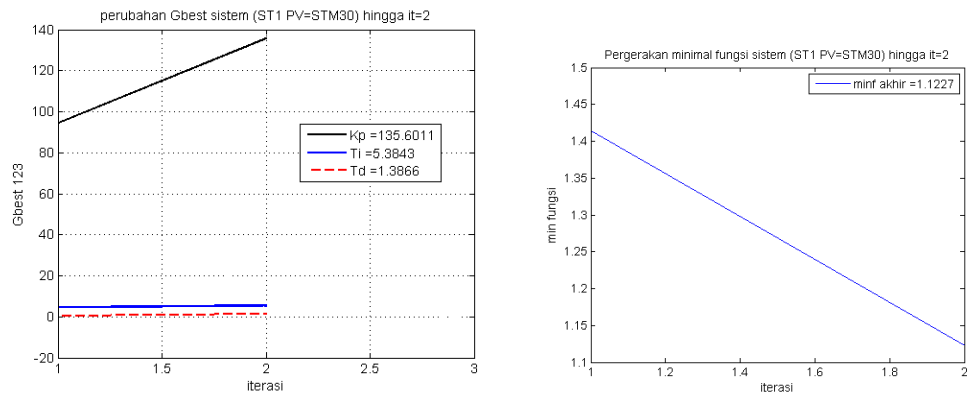
Gambar A.3.3.2 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST2 PV=STM20

A.3.4 PV STM30

➤ Sumbu putar horisontal

Tabel A.3.4.1 Perbandingan performansi sistem (ST1 PV=STM30)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	1.65	3.018	0.6270417	24.696
ZN-PID	243596.27	52024045	285.15249	0.0024	0.00504	0.6973261	0.08784
PSO-PID	135.6011	25.184676	188.02295	0.03024	0.06	0.0019358	0.01824

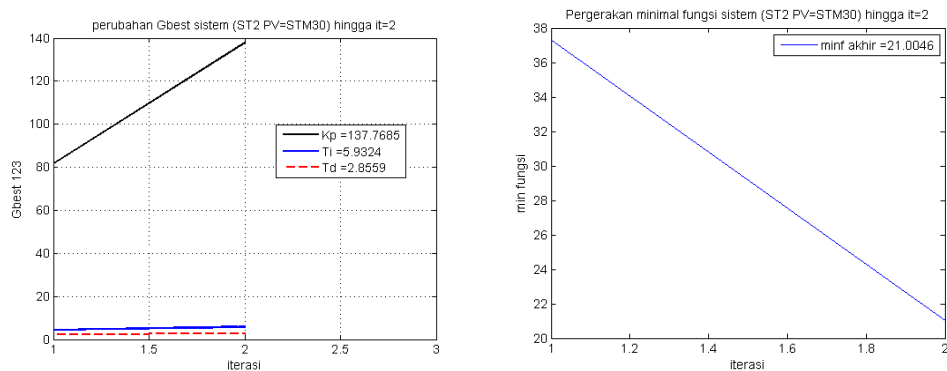


Gambar A.3.4.1 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST1 PV=STM30

➤ Sumbu putar vertikal

Tabel A.3.4.2 Perbandingan performansi sistem (ST2 PV=STM30)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	5.8	11.2	0.8845039	350.3
ZN-PID	243596.27	13808747	1074.3035	0.009	0.019	0.69745	0.331
PSO-PID	137.76851	23.223232	393.45336	0.151	0.32	0.0102661	0.114



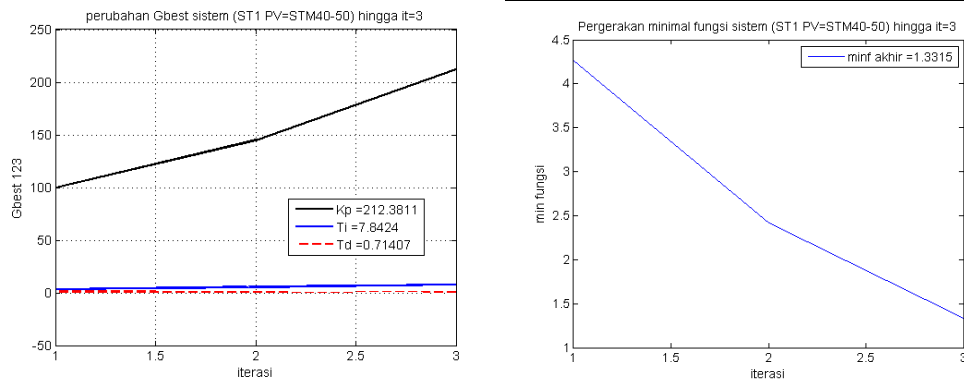
Gambar A.3.4.2 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST2 PV=STM30

A.3.5 PV STM40-50

➤ Sumbu putar horisontal

Tabel A.3.5.1 Perbandingan performansi sistem (ST1 PV=STM40-50)

Kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	2.528	4.752	0.7461287	62.352
ZN-PID	243596.27	32856990	451.49559	0.004	0.008	0.6975726	0.1392
PSO-PID	212.38107	27.081021	151.65389	0.0612	0.122	0.0169248	0.0496

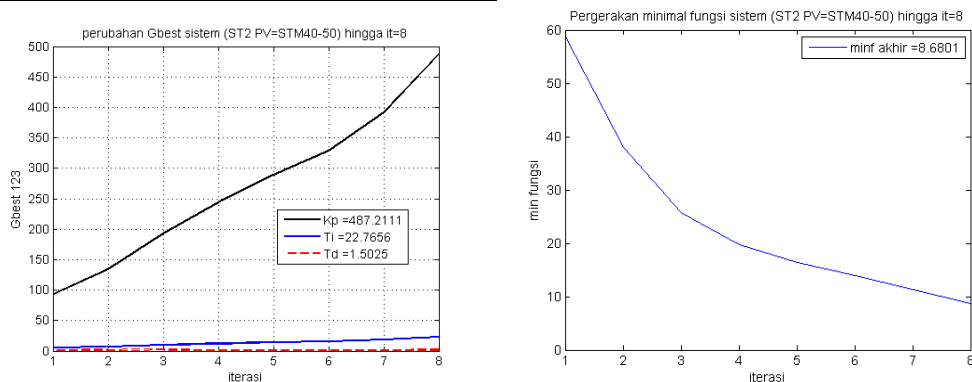


Gambar A.3.5.1 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST1 PV=STM40-50

➤ Sumbu putar vertikal

Tabel A.3.5.2 Perbandingan performansi sistem (ST2 PV=STM40-50)

kontroler	Parameter PID			Performansi sistem			
	Kp	Ki	Kd	tr (det)	tp (det)	mo	ts (det)
Close-loop	-	-	-	7.74	15.12	0.9128216	636.66
ZN-PID	243596.27	10274193	1443.8883	0.0128	0.0256	0.6976601	0.4448
PSO-PID	487.21112	21.401198	732.02534	0.128	0.2544	0.0183095	0.104



Gambar A.3.5.2 iterasi & perubahan minimal fungsi fitness tracker ST2 PV=STM40-50

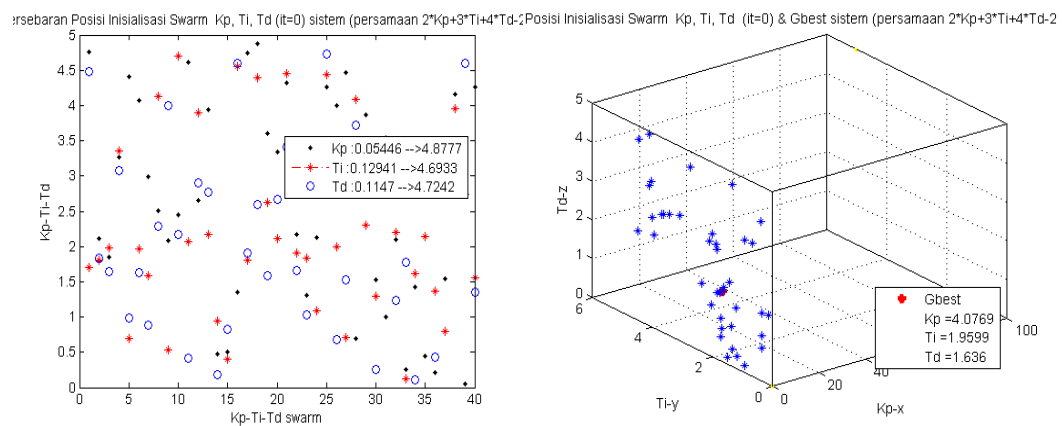
Lampiran C

Validasi PSO

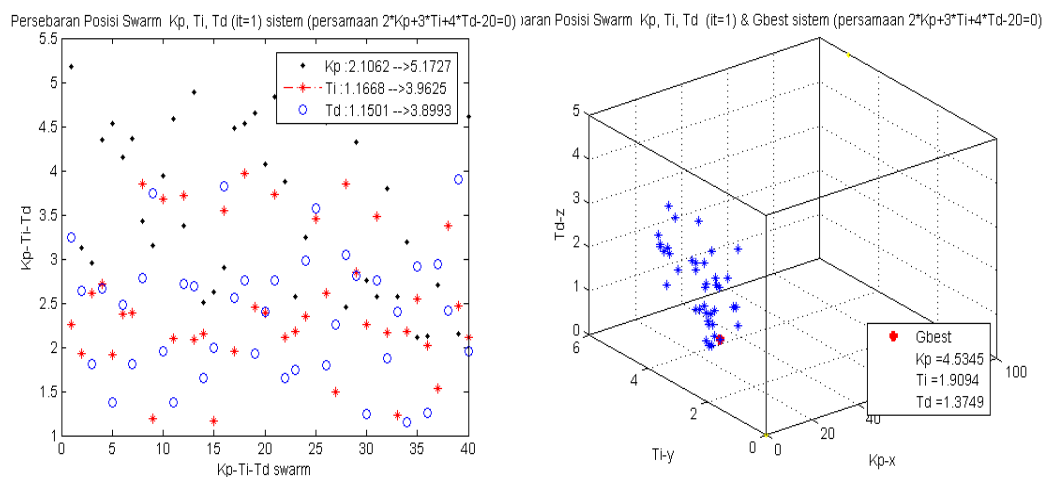
Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan salah satu teknik optimasi suatu model atau persamaan. Pada penelitian ini PSO digunakan untuk mencari nilai parameter PID (K_p , K_i , K_d). Pada lampiran ini dilakukan validasi algoritma PSO yang digunakan. Validasi yang dilakukan adalah dengan mencari nilai suatu persamaan yang mengandung 3 variabel. Persamaan yang digunakan,

$$2K_p + 3T_i + 4T_d = 20 \quad (C.1)$$

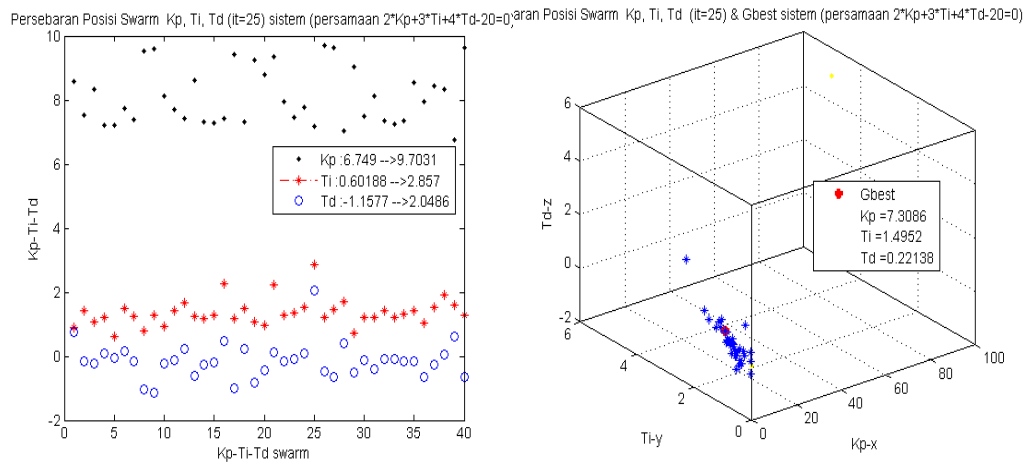
Berikut adalah Gambar-Gambar proses pencarian nilai persamaan yang dimaksud.



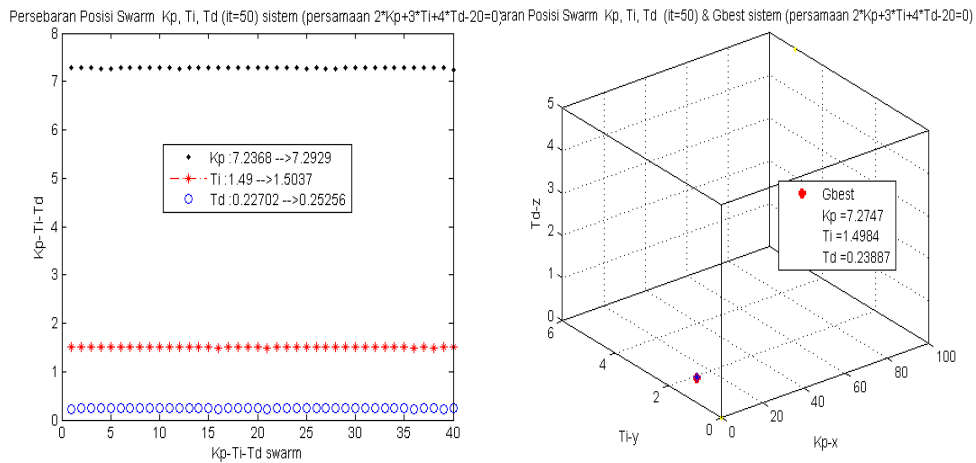
Gambar C1. Persebaran 40 partikel swarm dan nilai Gbest inisialisasi



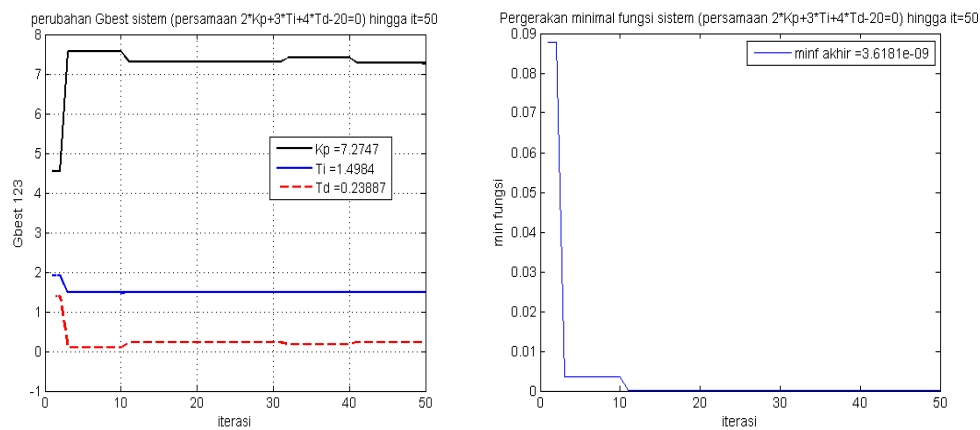
Gambar C2. Persebaran swarm dan nilai Gbest pada iterasi ke 1



Gambar C3. Persebaran swarm dan nilai Gbest pada iterasi ke 25



Gambar C4. Persebaran swarm dan nilai Gbest pada iterasi ke 50 (akhir)



Gambar C5 Pergerakan nilai Gbest dan minimal fitness function sampai akhir iterasi

Dari Gambar C5 diperoleh nilai $K_p = 7,2747$, $T_i = 1,4984$, dan $T_d = 0,2389$ pada iterasi ke-50 dengan minimal fitness function $3,6181 \times 10^{-9}$. Bila nilai K_p , T_i , dan T_d disubstitusikan ke dalam ruas kiri persamaan C.1, diperoleh

$$\begin{aligned} 2K_p + 3T_i + 4T_d &= 2(7,2747) + 3(1,4984) + 4(0,2389) \\ &= 14.5494 + 4.4952 + 0.95548 \\ &= 20,00008 \end{aligned}$$

Hasil yang diperoleh mendekati nilai yang sebenarnya.

Tabel C.1 berikut adalah nilai variabel K_p , T_i , dan T_d persamaan C.1 yang lain dengan menggunakan algoritma PSO.

Tabel C.1 Hasil optimasi persamaan $2K_p + 3T_i + 4T_d = 20$ menggunakan PSO

No	Iterasi	Hasil			Hasil substitusi
		K_p	T_i	T_d	
1	17	3.7276	3.5189	0.497	19.9999
2	26	1.7437	1.418	3.0647	20.0002
3	36	2.2591	2.5176	1.9822	19.9998
4	41	1.4491	3.6699	1.523	19.9999
5	42	1.6331	3.6524	1.4442	20.0002
6	50	7.2747	1.4984	0.23887	20.00008

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran B

Perhitungan Posisi Matahari

Posisi matahari terhadap suatu lokasi dipermukaan bumi dapat direpresentasikan dalam posisi sudut elevasi atau sudut *altitude* dan sudut *azimuth*. Berikut adalah contoh langkah perhitungan untuk menentukan posisi matahari dan informasi lain terkait matahari dengan data-data sebagai berikut

- lokasi kota Sidayu kabupaten Gresik
 - lintang selatan : $-6.99465^\circ = -6^\circ 59' 41''$
 - bujur timur : $112.562^\circ = 112^\circ 33' 43''$
- waktu : 10:00:00 WIB
- tanggal : 28 Desember 2015 $\rightarrow d=362$ hari
- beda waktu GMT : 7 jam

berdasarkan persamaan (2.1) samapai dengan persamaan (2.13) langkah perhitungan sebagai berikut;

- LSTM (*Local Standard Time Meridian*)

$$LSTM = 15^0 \cdot (LT - GMT) = 15^0 \cdot (7) = 105^0$$
- B (*day angle*)

$$B = \frac{360}{365}(d - 81) = \frac{360}{365}(362 - 81) = 277,151^0$$
- EoT (*equation of time*)

$$\begin{aligned} EoT &= 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \\ &= 9,87 \sin(2 \cdot (277,151^0)) - 7,53 \cos(277,151^0) - 1,5 \sin(277,151^0) \\ &= -1,8871 \text{ menit} = -1' 53'' \end{aligned}$$
- TC (*Time Correction*)

$$\begin{aligned} TC &= 4(Longitude - LSTM) + EoT \\ &= 4(112,562 - 105) + (-1,8871) = 28,3607 \text{ menit} = 28' 21'' \end{aligned}$$
- LST (*Local Solar Time*)

$$LST = LT + \frac{TC}{60} = 10 + \frac{28,3607}{60} = 10,4727 \text{ jam} = 10 28' 22''$$

- Sudut jam HRA (*Hour Angle*)

$$HRA = 15^0(10,4727 - 12) = -22,9098^\circ = -22^\circ 54' 35''$$

- Sudut Deklinasi (δ)

$$\delta = 23,45^0 \cdot \sin(B)$$

$$= 23,45^0 \cdot \sin(277,151^0) = -23,2676^\circ = -23^\circ 16' 3''$$

- Sudut Elevasi (α)

$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \sin \varphi - \cos \delta \cos \varphi \cos(HRA))$$

$$= \arcsin[\sin(-23,2676^\circ) \sin(-6,99465^\circ) \dots$$

$$- \cos(-23,2676^\circ) \cos(-6,99465^\circ) \cos(-22,9098^\circ)]$$

$$= \arcsin[0,048105 + 0,839906] = 62,6244^\circ = 62^\circ 37' 28''$$

- Sudut Zenith (ζ)

$$\zeta = 90^0 - 62,6244^\circ = 27,3756^\circ = 27^\circ 22' 32''$$

- Sudut Azimuth (γ)

karena $LST < 12$ atau $HRA < 0$, maka

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos(HRA)}{\cos \alpha}\right)$$

$$= \arccos\left(\frac{\sin(-23,2676^\circ) \cos(-6,99465^\circ) - \cos(-23,2676^\circ) \sin(-6,99465^\circ) \cos(-22,9098^\circ)}{\cos(62,6244^\circ)}\right)$$

$$= \arccos\left(\frac{-0,392086 - (-0,103048)}{0,459822}\right) = 128,946^\circ = 128^\circ 56' 45''$$

- Waktu matahari terbit (*sunrise*)

$$sunrise = 12 - \frac{1}{15^0} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) - \frac{TC}{60}$$

$$= 12 - \frac{1}{15^0} \arccos(-\tan(-6,99465^\circ) \tan(-23,2676^\circ)) - \frac{28,3607}{60}$$

$$= 12 - 6,20161 - 0,472678 = 5,32571 = 5^\circ 19' 33''$$

- Waktu matahari terbenam (*sunset*)

$$sunset = 12 + \frac{1}{15^0} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) - \frac{TC}{60}$$

$$= 12 + \frac{1}{15^0} \arccos(-\tan(-6,99465^\circ) \tan(-23,2676^\circ)) - \frac{28,3607}{60}$$

$$= 12 + 6,20161 - 0,472678 = 17,7289 = 17^\circ 43' 44''$$

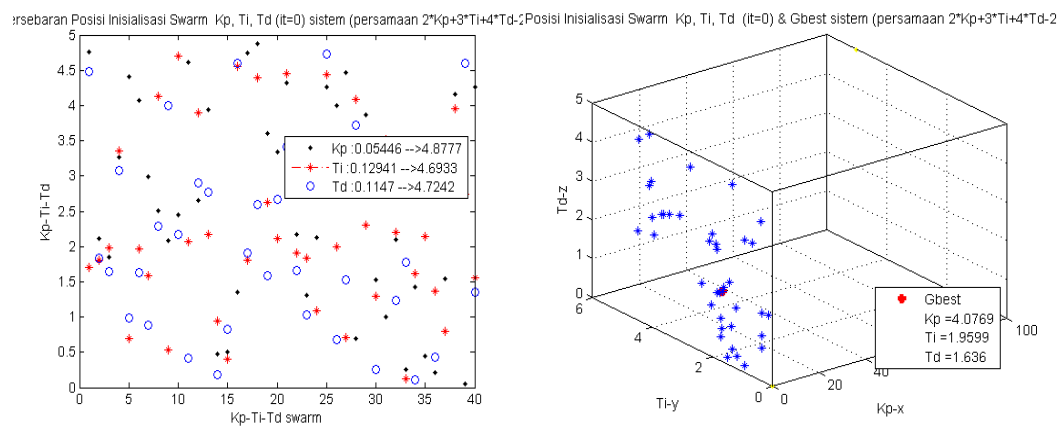
Lampiran C

Validasi PSO

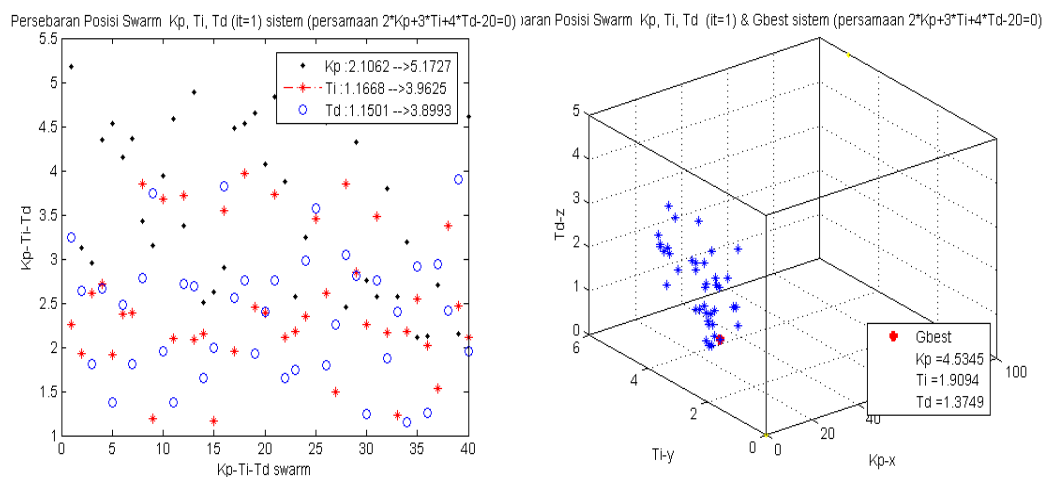
Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan salah satu teknik optimasi suatu model atau persamaan. Pada penelitian ini PSO digunakan untuk mencari nilai parameter PID (K_p , K_i , K_d). Pada lampiran ini dilakukan validasi algoritma PSO yang digunakan. Validasi yang dilakukan adalah dengan mencari nilai suatu persamaan yang mengandung 3 variabel. Persamaan yang digunakan,

$$2K_p + 3T_i + 4T_d = 20 \quad (C.1)$$

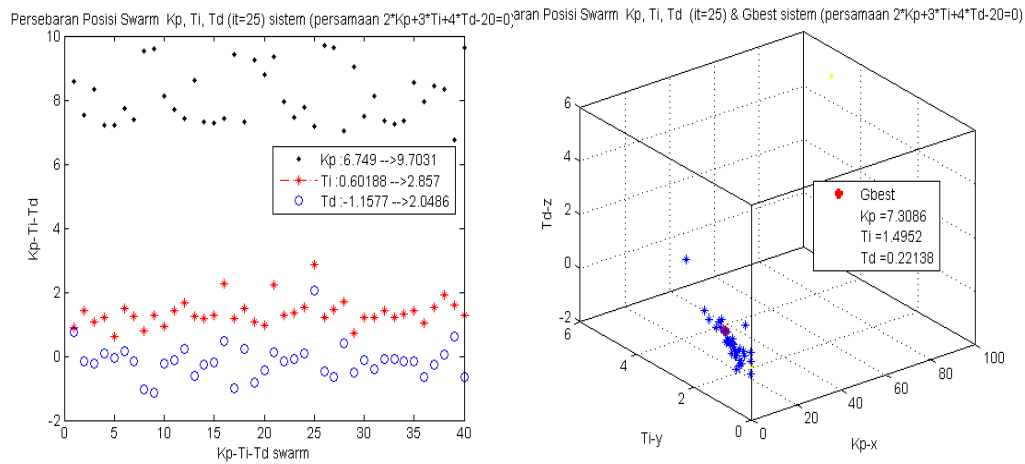
Berikut adalah Gambar-Gambar proses pencarian nilai persamaan yang dimaksud.



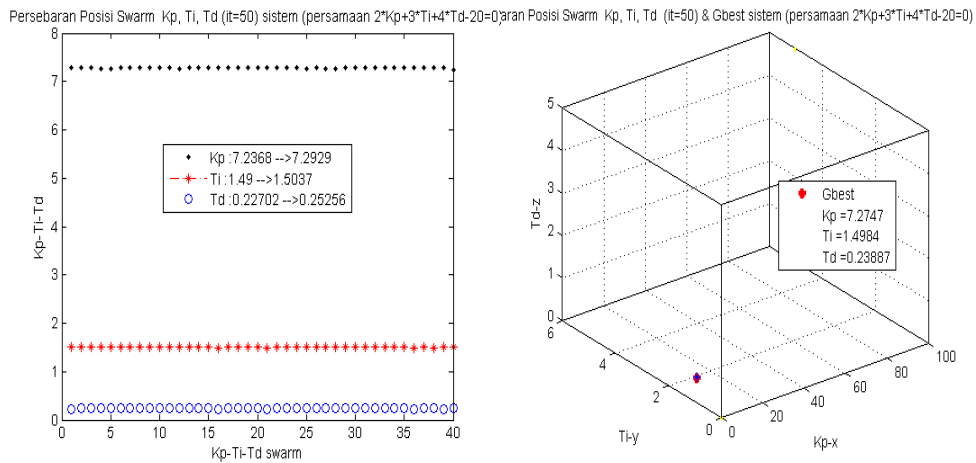
Gambar C1. Persebaran 40 partikel swarm dan nilai Gbest inisialisasi



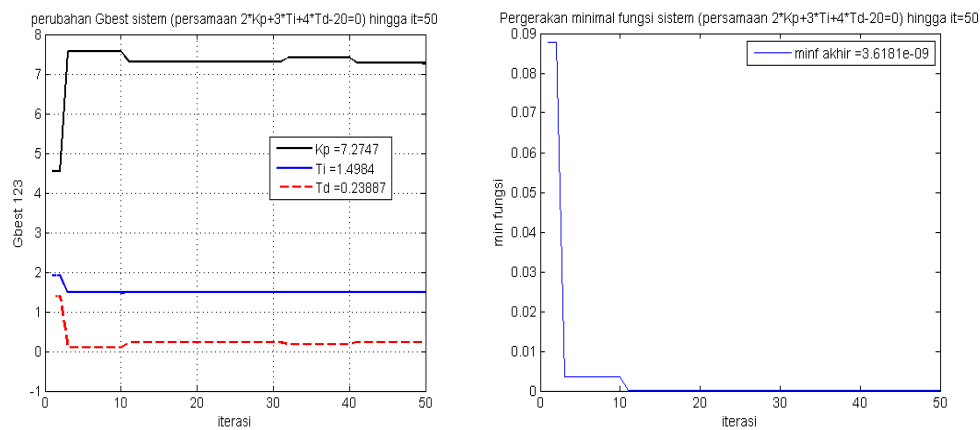
Gambar C2. Persebaran swarm dan nilai Gbest pada iterasi ke 1



Gambar C3. Persebaran swarm dan nilai Gbest pada iterasi ke 25



Gambar C4. Persebaran swarm dan nilai Gbest pada iterasi ke 50 (akhir)



Gambar C5 Pergerakan nilai Gbest dan minimal fitness function sampai akhir iterasi

Dari Gambar C5 diperoleh nilai $K_p = 7,2747$, $T_i = 1,4984$, dan $T_d = 0,2389$ pada iterasi ke-50 dengan minimal fitness function $3,6181 \times 10^{-9}$. Bila nilai K_p , T_i , dan T_d disubstitusikan ke dalam ruas kiri persamaan C.1, diperoleh

$$\begin{aligned} 2K_p + 3T_i + 4T_d &= 2(7,2747) + 3(1,4984) + 4(0,2389) \\ &= 14.5494 + 4.4952 + 0.95548 \\ &= 20,00008 \end{aligned}$$

Hasil yang diperoleh mendekati nilai yang sebenarnya.

Tabel C.1 berikut adalah nilai variabel K_p , T_i , dan T_d persamaan C.1 yang lain dengan menggunakan algoritma PSO.

Tabel C.1 Hasil optimasi persamaan $2K_p + 3T_i + 4T_d = 20$ menggunakan PSO

No	Iterasi	Hasil			Hasil substitusi
		K_p	T_i	T_d	
1	17	3.7276	3.5189	0.497	19.9999
2	26	1.7437	1.418	3.0647	20.0002
3	36	2.2591	2.5176	1.9822	19.9998
4	41	1.4491	3.6699	1.523	19.9999
5	42	1.6331	3.6524	1.4442	20.0002
6	50	7.2747	1.4984	0.23887	20.00008

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Ashraf B, Ahmad A. M, Farhan A. Salem, (2013), "Design and Performance of Solar Tracking Photo-Voltaic System; Research and Education", in *International Journal Of Control, Automation And Systems*, pp 49-55
- Alrijaldjiz, Astrowulan, K., (2010), "Optimasi Parameter kontroler PID Berbasis Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) Untuk Sistem dengan Waktu Tunda", *Tesis*, Program S2 Teknik Elektro FTI-ITS, Surabaya.
- Catarius, A., Christiner, M., (2010), *Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracker*, A Master Qualifying Project, Worcester Polytechnic Institute, Worcester
- Chong, K.K., Wong C.W. (2010), "General Formula for On-Axis Sun-Tracking System" dalam *Solar Collectors and Panels, Theory and Applications*, ed. Dr. Reccab Manyala, Sciyo, Rijeka, hal 265-292
- Fathoni M., Abadi I., Ya'umar, (2012), "Penerapan Kontrol PSF (*Particle Swarm Fuzzy*) Pada Sistem Penjejak Matahari 2 Sumbu", *JURNAL TEKNIK POMITS*, Vol. 1, No. 1, hal 1-5.
- Fitriana, Ira, (2013), "Potensial Sumber Daya Energi Terbarukan" dalam *Indonesia Energy Outlook 2013*, eds, Sugiyono, A., Permana, A.D., Boedoyo, M.S., Adiarso, BPPT, Jakarta, hal. 18.
- Kennedy, J. and Eberhart, C., "Particle Swarm Optimization," *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, Australia, pp. 1942-1948, 1995
- Koussa, M., Haddadi, M., Saheb, D., Hadji, S., (2012a), "Sun tracking mechanism effects on flat plate photovoltaic system performances for different step time and main parameters affecting the obtained gains: case of North Africa and Mediterranean site", in *Energy Procedia* 18 (2012) 817 – 838
- Koussa, M., Haddadi, M., Saheb, D., Hadji, S., (2012b), "Sun tracker systems effects on flat plate photovoltaic PV systems performance for different sky states: A case of an arid and hot climate", in *Energy Procedia* 18 (2012) hal 839 – 850

- Lakshmi K. V. dan Srinivas P., (2015), "Optimal Tuning of PID Controller using Particle Swarm Optimization" dalam *International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, 978-1-4799-7678-2/15
- Lee J. F., Nasrudin A.R, (2013), "Performance comparison of Dual-Axis solar tracker vs Static Solar system in Malaysia" in *IEEE Conference on Clean Energy and Technology*, Kuala lumpur, pp 102-107
- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H, (2009), "A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output" in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Tehran pp 1800–1818
- Ogata K. (2002), *Modern Control Engineering*, 4th edition, Prentice-Hall, Inc.,
- Patra J., Khuntia P. S., Samal S., (2013), " Analysis and Comparison of different performance index factor for Conventional PID & GA plus PID Controller", *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS)*, Vol 4, No. 3, pp 242-250.
- Prinsloo G., Dobson R., (2014), "*Solar Tracking, Sun Tracking, Sun Tracker, Solar Tracker, Follow Sun, Sun Position*", Stellenbosch University-South Africa
- Rahardjo I. dan Fitriana I, (2005), "Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Indonesia," in *Strategi Penyediaan Listrik Nasional Dalam Rangka Mengantisipasi Pemanfaatan PLTU Batubara Skala Kecil, PLTN, Dan Energi Terbarukan*, Jakarta, 2006, hal. 43-52.
- Sao, Khushboo, Singh D. Kumar, Agrawal, Amit, (2015) "Study of DC Motor Position Control using Root Locus and PID Controller in MATLAB", *International Journal for Scientific Research & Development*| Vol. 3, Issue 05, 2015 | ISSN (online): 2321-0613
- Sholihin, M., Tack, L., Kean, M., (2011), "Tuning of PID Controller Using Particle Swarm Optimization (PSO)", in *Proceeding of International Conference on Advanced Science*, January 2011, pp 458-461.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Abdul Adhim, penulis dilahirkan pada tanggal 21 Oktober 1978 di Gresik Jawa Timur. Pendidikan formal penulis di mulai pada tahun 1982 sampai tahun 1985 di RA Tarbiyatul Islam Karangrejo Ujungpangkah. Kemudian pada tahun 1985-1991 penulis belajar di dua tempat, pada pagi hari di SDN Karangrejo Ujungpangkah dan sore hari di Madrasah Ibtidaiyah Tarbiyatul Islam Karangrejo Ujungpangkah.

Selanjutnya pada tahun 1991-1994 penulis belajar di Madrasah Tsanawiyah Almuniroh Ujungpangkah Gresik, kemudian di SMU Kanjeng Sepuh Sidayu Gresik tahun 1994-1997. Pada tahun 1997 penulis melanjutkan belajar S1 di Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan lulus tahun 2003. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan belajar S2 di Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan beasiswa BPP-DN yang diselenggarakan oleh Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi dan alhamdulillah penulis lulus tahun 2016. Penulis dapat dihubungi melalui email abduladhimsttq@gmail.com.

Salam,

Abdul Adhim